INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
LA ERA DE LOS TIRANOSAURIOS | EL FIN DE LA LEY DE MOORE | LA FÍSICA DE LOS GLUONES





INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Julio 2015 InvestigacionyCiencia.es

Edición española de Scientific American

PARTÍCULAS
La física misteriosa de los gluones

COMPUTACIÓN
El fin de la ley de Moore

PREHISTORIA
Matemáticas de la transición neolítica

LA ERA DE LOS TIRANOSAURIOS

Nueva luz sobre la evolución de estos voraces depredadores

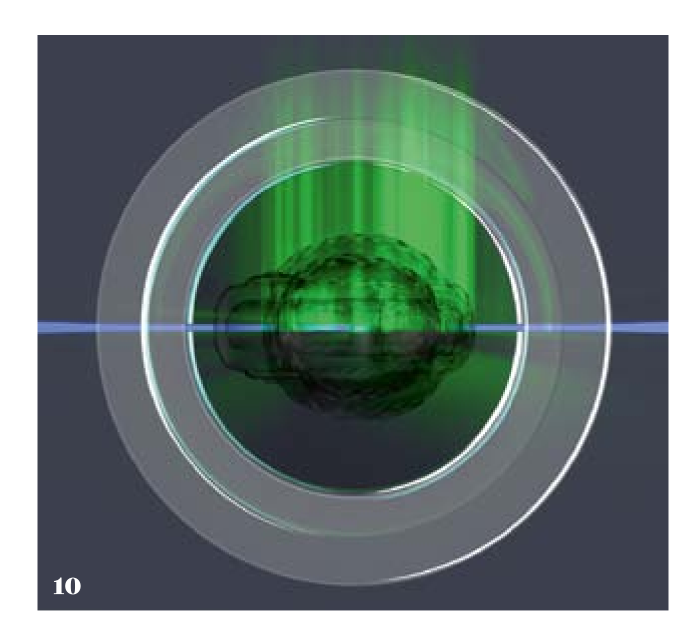
9 770210 136004 00466

6,90 EUROS



ARTÍCULOS

THINKSTOCKPHOTOS/YELENA YEMCHUK



10



52

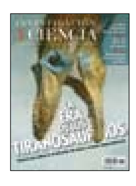


86

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



Qianzhousaurus, cuyo fósil se descubrió durante unas obras de construcción en China, es una de las incorporaciones más recientes al árbol genealógico de los tiranosaurios. Hallazgos como este están revolucionando el conocimiento que se tenía sobre el origen y evolución de este grupo. Los tiranosaurios, de una diversidad sorprendente, merodearon por la Tierra hasta el final de la edad de los dinosaurios. Ilustración de James Gurney.

redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero y marzo 2015

CIENCIA Y ÉTICA

El artículo «La edición genética, más precisa», de Margaret Knox [Investigación y Ciencia, febrero de 2015], explica la nueva técnica de edición CRISPR y menciona las inquietudes éticas que genera su posible aplicación. Estas revelan un aspecto muy general de la investigación científica: que debemos ser conscientes de sus implicaciones éticas, sociales y legales.

La mayor parte de las investigaciones pueden tener aplicaciones positivas y negativas, si bien a menudo estas solo son neutras desde un punto de vista ético. No obstante, las regulaciones *ex post facto* sobre asuntos científicos suelen ser exabruptos reaccionarios que, por lo común, no tienen otra base que el temor a un mal uso de los avances científicos. En el mejor de los casos se toman con información insuficiente y, con frecuencia, acaban dañando la promoción de la ciencia.

Las cuestiones éticas deberían salir a la luz durante las primeras fases de la investigación básica y del desarrollo de nuevas técnicas. Y cualquier regulación resultante debería buscar siempre un equilibrio que tenga en cuenta la posibilidad real de obstaculizar dichas innovaciones.

Dov Greenbaum
Escuela de medicina de la Universidad Yale
Director del Instituto Zvi Meitar para las Implicaciones Legales de las Tecnologías Emergentes
Herzliya, Israel

¿Y LA POBLACIÓN MUNDIAL?

En «Un rompecabezas global» [Investigación y Ciencia, febrero de 2015], Michael E. Webber explica la necesidad de coordinar los retos en energía, agua y alimentación para garantizar los recursos de una población mundial en aumento. Sin embargo, el primer objetivo debería ser estabilizar la población, ya que, mientras esta siga creciendo, cualquier otra medida no será más que un parche temporal.

Avi Ornstein
New Britain, Connecticut

Responde Webber: *El incremento de la población mundial reviste importancia, pero no tanta como el crecimiento económico: la demanda de alimentos, energía y agua está aumentando más rápido que el número de habitantes, ya que, cuando sale de la pobreza, la gente tiende a consumir más carne y más electricidad —recursos que, a su vez, requieren mucha agua—. El ciudadano chino medio, por ejemplo, gasta una cuarta parte de la electricidad que consume un estadounidense. Pero, a medida que los ingresos del primero aumentan, esa diferencia se reduce. Por otro lado, las ciudades están creciendo, lo que tiende a reducir la natalidad.*

Por ello, lo primero debería ser garantizar el acceso a la energía, agua y comida necesarias para llevar a cabo una vida libre y próspera, sin todos los problemas ambientales y de seguridad de los viejos métodos. Además, el impulso político que ello implica (invertir en nuevas tecnologías, rediseñar las relaciones comerciales y fomentar una cultura de conservación) es más sencillo y asumible que los controles demográficos, censurables desde muchos puntos de vista.

MUNDOS ARCHIPIÉLAGO

El artículo de René Heller «Más acogedores que la Tierra» [Investigación y Ciencia; marzo de 2015] sobre supertierras concluye que un planeta con océanos más masivo que la Tierra —y, por tanto, con una superficie más plana debido a su mayor gravedad— sería un «mundo de archipiélagos», con un gran número de islas y una mayor biodiversidad.

Sin embargo, al ser menor la diferencia de altitud entre el punto más elevado y el más profundo, un planeta sin accidentes podría convertirse fácilmente en un mundo completamente acuoso, sin tierra firme. La biodiversidad de un planeta de archipiélagos sería más sensible a la cantidad total de agua y al clima que en la Tierra.

J. Carlos Kuruvilla

Responde Heller: *Es cierto que, para un radio dado, cuanto más suave sea la superficie de un planeta, menos agua podrá albergar antes de cubrirse por completo de agua. En el caso extremo de un mundo perfectamente regular y con una gran gravedad de superficie, un vaso de agua bastaría para formar un «oceano» de nanómetros de profundidad.*

Sin embargo, debido a su gran tamaño, una supertierra debería tener tanto grandes océanos como topografías planas. Un planeta con un radio 1,4 veces mayor que el de la Tierra y con un océano con una profundidad promedio de solo 2 kilómetros albergaría 2000 millones de kilómetros cúbicos de agua, casi el doble que la Tierra. En general, un mundo de archipiélagos podría acoger mucha más agua que nuestro planeta.

Errata corrige

La nota **El LHC reanuda sus experimentos** [Apuntes; Investigación y Ciencia, abril de 2015], de Clara Moskowitz, incluye una fotografía de un «electroimán séxtuple». Aunque el dispositivo que muestra la imagen ha sido probado en el CERN, no forma parte del LHC. El término es, además, incorrecto, ya que en realidad se trata de un electroimán sextupolar.

En el artículo **Un vendaje inteligente** [por Mark Peplow; Investigación y Ciencia, junio de 2015], el nombre del autor que debe aparecer bajo el subtítulo, en la página 57, es «Mark Peplow», no «Joshua A. Krisch».

Estos errores han sido corregidos en la edición digital.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es
La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



LOS CRECIENTES COSTES del telescopio James Webb (*arriba*) han hecho que las propuestas para construir observatorios aún mayores, como el Telescopio Espacial de Alta Definición (*derecha*), se reciban con escepticismo.

ASTRONOMÍA

La vida después del Hubble

El ocaso del telescopio espacial Hubble ha suscitado la propuesta de un observatorio aún mayor que el James Webb

Si hubiese que premiar al observatorio más productivo de la historia, el galardón recaería sin duda en el telescopio espacial Hubble. Pero sus días están contados; su órbita y sus instrumentos continúan degradándose y su inevitable final hará mella en la toma de datos astrofísicos y cosmológicos [*véase* «Veinticinco años del Hubble», por Axel M. Quetz y Uwe Reichert; Investigacion y Ciencia, abril de 2015]. Dado que la atmósfera terrestre bloquea buena parte de la radiación ultravioleta e infrarroja, las observaciones en estas longitudes de onda deben llevarse a cabo desde el espacio, donde mora el Hubble. Pero ninguno de los futuros observatorios espaciales de la NASA —el telescopio James Webb, de 6,5 metros, y el WFIRST, un satélite de infrarrojos de 2,4 metros inicialmente concebido para el espionaje— cubrirá todo ese espectro de longitudes de onda. «Cuando el Hubble se vaya, se habrá ido», señala John Mather, premio nóbel y astrofísico del Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la NASA. «Y no tenemos nada a mano que haga lo mismo que él.»

Por esa razón, Mather y otros astrónomos han propuesto la construcción de un sucesor enorme, con un espejo de entre 10 y 12 metros de diámetro; es decir, entre cuatro y cinco veces mayor que el del Hubble. Semejantes dimensiones permitirían abordar varias cuestiones de primer orden, como el estudio de galaxias lejanas, el del sistema solar exterior y la búsqueda de vida en exoplanetas similares a la Tierra. El proyecto ha sido bautizado con el nombre provisional de Telescopio Espacial de Alta Definición, o HDST. Al igual que el Hubble, observaría en el visible, el ultravioleta y el infrarrojo cercano. Haciendo honor a la alta definición de la que presume su nombre, podría resolver estructuras de 300 años luz en galaxias situadas en los confines del universo visible, algo que permitiría entender mejor los procesos de formación estelar y la naturaleza de la materia y la energía oscuras. Además, podría examinar con gran detalle docenas de exoplanetas parecidos al nuestro y buscar en ellos señales de vida extraterrestre. La propuesta fue publicada en un informe de verano de la Asociación de

CORTESÍA DE DAVID HIGGINBOTHAM, CENTRO DE VUELOS ESPACIALES MARSHALL Y NASA (*James Webb*); CORTESÍA DEL CENTRO DE VUELOS ESPACIALES GODDARD Y NASA (*HDST*)

Universidades para la Investigación Astronómica.

No obstante, algunos investigadores vinculados al proyecto temen que, por amplio que sea el interés que despierte un instrumento así, la propuesta está abocada al fracaso, ya que el coste de tales observatorios suele ser tan astronómico como su utilidad. «La NASA se ha vuelto más conservadora desde que empezamos con el Webb», señala Mather, científico jefe de dicho proyecto. Al principio se calculó que el instrumento se enviaría al espacio en 2011 y que costaría unos 1600 millones de dólares. Hoy, el lanzamiento no se prevé para antes de octubre de 2018 y el presupuesto se ha inflado hasta los casi 9000 millones. «Después de que el proyecto estuviese a punto de morir por culpa de los sobrecostes, ya nadie quiere pensar a lo grande», asegura el investigador.

Ningún astrónomo que haya participado en el informe sobre el HDST se aventurará a dar en público una cifra sobre su posible coste, más allá de que resultaría bastante abultada. Los críticos del proyecto, escépticos sobre su viabilidad económica, sugieren que un telescopio de banda ancha algo menor, del tamaño del Webb, se ajustaría mejor a los intereses de la comunidad. Otros sostienen que una nueva generación de observatorios terrestres de 30 metros, ahora en construcción, podría llevar a cabo buena parte de las mismas investigaciones con un coste mucho menor.

Sin embargo, Marc Postman, astrónomo del Instituto Científico del Telescopio Espacial y coautor del informe sobre el HDST, considera poco probable que tales instalaciones sean capaces de abordar las mismas preguntas que un telescopio espacial. Bajo la atmósfera terrestre, incluso los mejores observatorios sufren los efectos de las turbulencias y de la luminiscencia nocturna, una débil luz emitida por las reacciones químicas atmosféricas que corrompe las observaciones delicadas. Además, ni los telescopios terrestres ni el Webb podrán fotografiar e investigar en detalle numerosos exoplanetas, lo que disminuye la probabilidad de encontrar alguno con vida. Para algunas cuestiones, solo un gran telescopio espacial de banda ancha ofrece una oportunidad de dar con la respuesta.

Según los autores del informe, este telescopio de ensueño podría lanzarse al espacio a principios de la década de 2030, pero solo si la NASA y otras agencias espaciales comienzan a planificarlo ya. Aunque parezca un período de incubación excesivo, supondría una notable mejora con respecto al Hubble, cuya historia empezó con un informe visionario que el astrónomo Lyman Spitzer escribió en 1946. En astrofísica, los grandes saltos cualitativos, como los logrados por el Hubble y los que promete su posible sucesor, requieren enormes inversiones no solo de dinero, sino también de tiempo, explica Postman. «Los cambios revolucionarios en el entendimiento del cosmos no llegan con pasos pequeños y graduales», concluye el investigador.

—Lee Billings

MATERIALES

Impresión de baterías

Una nueva técnica de extrusión permite producir dos de los tres componentes básicos de una pila en un solo paso

El futuro de la energía sostenible pasará por imprimir baterías. Así al menos piensan los ingenieros de PARC, la reputada compañía de investigación y desarrollo con sede en California y propiedad de Xerox. La empresa ha diseñado un nuevo proceso de fabricación que ahorra costes y que, algún día, quizá permita producir todas las partes de una pila del mismo modo en que extraemos el dentífrico de un tubo: exprimiendo.

En general, construir una batería requiere un gran número de pasos. Primero, dos máquinas fabrican por separado los electrodos extendiendo capas pastosas de material energético sobre láminas metálicas. Una vez se han secado y comprimido, se cortan con el tamaño deseado y se introduce entre ellos un separador de plástico para evitar cortocircuitos. Por último, la batería se envasa en un recipiente de material no conductor y el conjunto se rellena con un electrolito líquido que transporte la carga entre los electrodos.

El nuevo método de impresión simplifica el proceso. En abril, en una reunión de la Sociedad de Investigación en Materiales celebrada en San Francisco, Corie Cobb, de PARC, presentó un conjunto de boquillas y materiales que permiten imprimir dos tercios de la batería de una sola vez. La boquilla impresora, de dos cabezas, puede extrudir simultáneamente un cátodo de ion de litio y un separador de polímero. Hasta que Cobb no dé con una combinación de materiales que no se entremezclen durante la impresión, un técnico tendrá que añadir a mano un ánodo de grafito. Pero cuando puedan imprimirse los tres componentes a la vez, Cobb y sus colaboradores calculan que el proceso reducirá los costes de fabricación en un 15 por ciento. Con todo, algunos fabricantes ya han mostrado su interés por la versión de dos piezas. Los prototipos obtenidos hasta el momento funcionan tan bien como las pilas fabricadas con las técnicas habituales y los mismos materiales.

Disponer de baterías más económicas será fundamental para lograr vehículos eléctricos más asequibles y para que las compañías eléctricas puedan almacenar los excedentes generados por las fuentes eólicas y solares, las cuales son muy variables y no siempre se ajustan a la demanda de la red. A largo plazo, las baterías tal vez puedan imprimirse con todo tipo de formas apropiadas para nuevos aparatos, en lugar de los cubos y los cilindros con los que los diseñadores han de vérselas hoy.

—Katherine Bourzac



LAUREN NICOLE, GETTY IMAGES

EVOLUCIÓN

El origen del oído

Zanjado un debate centenario sobre la evolución del órgano auditivo

Los biólogos evolutivos llevan mucho tiempo preguntándose por qué el tímpano (la membrana que transmite las ondas sonoras al oído interno) de los humanos y de otros mamíferos guarda una notable semejanza con el de los reptiles y las aves. ¿Acaso la membrana y, por extensión, el sentido del oído proceden en esos grupos de un ancestro común? ¿O tal vez el órgano auditivo evolucionó en ellos de forma independiente hasta desempeñar la misma función, en un ejemplo de convergencia evolutiva? Una serie de experimentos recientes realizados en la Universidad de Tokio y en el Laboratorio de Morfología Evolutiva RIKEN de Japón han resuelto la incógnita.

Cuando se inhibió por medios genéticos el crecimiento del maxilar inferior en embriones de ratón y de pollo, los primeros no desarrollaron tímpano ni canal auditivo; en cambio, en las aves se formaron dos maxilares superiores de los que brotaron sendos tímpanos y canales auditivos. Los resultados, publicados en *Nature Communications*, confirman que el oído medio se forma a partir del maxilar inferior en los mamíferos y del superior en las aves, hecho que sustenta la hipótesis de que esa anatomía similar evolucionó de modo independiente en los mamíferos y en los reptiles y las aves. Los fósiles de huesecillos del oído avalan tal conclusión, pero el tímpano no fosiliza y no puede ser estudiado directamente.

—*Sarah Lewin*





EL PROGRAMA LINC escanea los rasgos faciales en busca de patrones que permitan emparejar una imagen con un individuo.

CONSERVACIÓN

Facebook para fieras

Los estudiosos de los leones podrán conocer el paradero de estos felinos gracias a una nueva técnica de reconocimiento facial

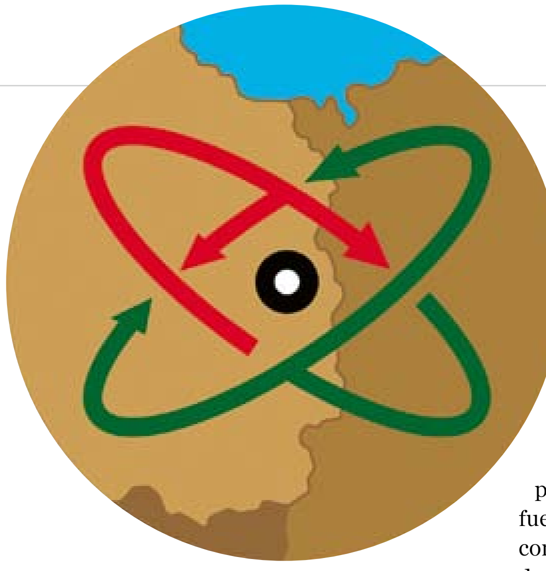
Ni el mismísimo rey de la jungla puede escapar de los fotógrafos en estos tiempos. El pasado junio, la organización keniata Lion Guardians inició la Red de Colaboradores para la Identificación de Leones (LINC, por sus siglas en inglés). Esta base de datos de perfiles de leones se está elaborando con el primer programa informático de reconocimiento facial diseñado a propósito para analizar las facciones de este gran felino e identificar cada individuo. Con LINC, la organización conservacionista y otros estudiosos de la fauna dispondrán de un medio más sencillo para saber la ubicación de cada león. Los desplazamientos de la especie a lo largo y ancho de África son poco conocidos y su seguimiento tropieza con todo tipo de trabas: los transmisores GPS resultan caros, la autonomía de sus pilas es de uno a tres años y solo pueden colocarse sedando al animal. Por si fuera poco, el pelaje del león adulto carece de rasgos reconocibles (a diferencia del que poseen el leopardo, el guepardo o el tigre, cuyas motas y franjas simplifican la identificación).

En los próximos meses, cerca de un millar de leones serán incorporados a LINC; cuantas más fotografías se introduzcan, más preciso resultará el programa a la hora de identificar un individuo. Mediante el seguimiento atento de las migraciones de los felinos, los conservacionistas podrán saber con mayor precisión dónde hallan pareja, agua o presas, así como detectar los sutiles cambios de la dinámica poblacional causados por la expansión humana.

No es preciso acercarse mucho al animal para obtener fotografías útiles. Basta con hacer el disparo desde una treintena de metros, asegura Stephanie Dolrenry, cofundadora de Lion Guardians. Tanto los leones más intrépidos como los más esquivos suelen girarse para mirar a sus perseguidores antes de huir.

—*Millie Kerr*

RICARDO DIAS, GETTY IMAGES (*oreja*); GK Y VICKY HART, GETTY IMAGES (*cabeza de león*); CORTESÍA DE JUSTIN DOWNS, IEF R&D (*cuadrícula con leones*)



FÍSICA

Fundamentos matemáticos de la guerra

La teoría cinética de los gases permite explicar la dinámica de ciertas maniobras bélicas

En 1939, Alemania atacó Polonia mediante una táctica militar que acabaría conociéndose como «guerra relámpago», o *Blitzkrieg*. La mortífera ofensiva consistía en descargar una oleada de ataques con gran potencia de fuego para sembrar la confusión en las líneas enemigas y penetrar en ellas de modo inesperado. Casi ochenta años después, un grupo de físicos rusos ha descubierto que tales agresiones se dejan describir mediante un modelo científico: la teoría cinética de los gases.

Los paralelismos resultan claros tras un poco de pensamiento creativo. Tanto a los ejércitos como a los gases se les puede asignar una densidad, ya sea de soldados por kilómetro cuadrado o de átomos por metro cúbico. Sus unidades básicas tienen también secciones eficaces medibles, las cuales definen su cobertura espacial: para los soldados, el alcance medio de las armas; para las moléculas del gas, el radio orbital típico de los electrones. Y, cuando las secciones eficaces se solapan, en ambos casos se produce una confrontación. Además, en el caso de una guerra relámpago, cabe considerar que el esparcimiento de los defensores guarda semejanzas con la disposición de las moléculas de un gas, muy separadas unas de otras.

Armados con esas analogías, Vladimir Aristov y Oleg Ilyin, de la Academia Rusa de las Ciencias, recopilaron datos históricos de las fuerzas alemanas y polacas durante la Segunda Guerra Mundial (el número de soldados, tanques, aviones y artillería, así como la velocidad inicial de la invasión de los vehículos motorizados) y simularon su comportamiento a partir de un modelo basado en la teoría cinética de los gases. Según esta, las moléculas de un gas se mueven con rapidez de manera aleatoria y colisionan entre sí a menudo, aunque puede imponerse un cierto orden si se fuerza a que el gas fluya a través de un conducto o una boquilla. En el modelo de Aristov e Ilyin, el ejército alemán quedaba descrito por una corriente concentrada de moléculas que se introducía con rapidez en un conjunto de partículas dispersas. Estas últimas representaban el ejército polaco.

Según los cálculos del modelo, que tuvo en cuenta la disminución en la velocidad causada por las colisiones, los alemanes tendrían que haber avanzado al ritmo de 50 kilómetros al día: justo como ocurrió durante los siete días y los 350 kilómetros de su incursión hasta Varsovia. Los investigadores también analizaron las guerras relámpago que tuvieron lugar en Francia en 1940 y en Stalingrado en 1941. En ambos casos, las predicciones del modelo coincidieron con los registros históricos sobre el avance de los frentes. Sin embargo, la analogía se desmoronaba cuando el ataque sorpresa inicial concluía y las tropas agredidas comenzaban a defenderse con mayor eficacia. Los resultados del trabajo aparecieron publicados el pasado mes de abril en la revista *Physical Review E*.

Los intentos de explicar fenómenos sociohistóricos por medio de la física abundan desde hace décadas. Los acontecimientos como la expansión de la peste bubónica en el siglo XIV suelen modelizarse mediante procesos de difusión lenta, empleados para describir, por ejemplo, la deriva aleatoria de una gota de tinta en un vaso de agua. La teoría cinética se aplica mejor a procesos más veloces, como una invasión rápida. Ilyin sostiene que su modelo podría usarse para predecir el avance de los frentes en una guerra futura, siempre y cuando los ejércitos se atuviesen a las tácticas bélicas tradicionales. Algo improbable hoy, dada la disponibilidad de armas nucleares y de vehículos aéreos no tripulados.

—Tim Palucka

THOMAS FUCHS (*ilustración*); © CEA, P. STROPPA (*exposición*)

AGENDA

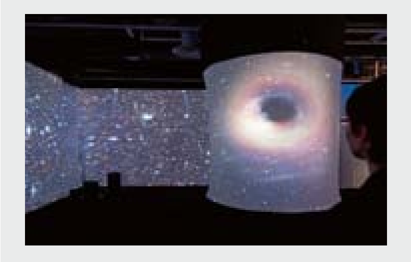
CONFERENCIAS

14 de julio
Teoría especial de la relatividad
Julio Güémez Ledesma, Universidad de Cantabria
Ciclo «Breve historia de la física»
Ateneo de Santander
Santander
www.unican.es/campus-cultural/Agenda

24 de julio
La sublime utilidad de la ciencia inútil
Pedro Miguel Echenique, Universidad del País Vasco
Conferencia divulgativa en el marco del Congreso Internacional sobre Colisiones Fotónicas, Electrónicas y Atómicas
Palacio de Congresos El Greco
Toledo
www.icpeac2015.com

EXPOSICIONES

2015: La odisea de la luz
Ciudad de las Ciencias y de la Industria
París
www.odysseedelalumiere.fr



Arrecifes de coral. Las ciudades secretas del mar.
Museo de Historia Natural
Londres
www.nhm.ac.uk

OTROS

Del 6 al 10 de julio – Curso
Células madre: De la investigación a la clínica
Universidad de Barcelona
www.ub.edu/juliols

Del 6 al 8 de julio – Curso
Cambio climático y la economía global
Fundación Ramón Areces
Madrid
www.fundacionareces.es

Del 29 de junio al 24 de julio – Campus para escolares
II Campus Cienci@ULL
Universidad de La Laguna
Tenerife
http://ciencia.fg.ull.es

ACUICULTURA

Uso y cultivo de laminarias, las grandes algas marinas

Además de presentar un notable interés comercial, estas macroalgas contribuyen al desarrollo de una acuicultura sostenible

CÉSAR PETEIRO Y MANUEL GARCÍA TASENDE

Las algas pardas del grupo Laminariales, comúnmente conocidas como laminarias, o *kelp* (nombre anglosajón), son las algas de mayor complejidad morfológica y las que alcanzan mayor tamaño. Desempeñan un papel importante en la formación y funcionamiento de los ecosistemas marinos costeros, donde crean bosques que proporcionan hábitat, refugio y alimento a un gran número de especies de fauna silvestre (peces, moluscos y crustáceos). Además, constituyen un recurso de gran interés económico, debido a sus diversos usos y aplicaciones.

Las laminarias se utilizan como materia prima para la extracción de polisacáridos (los alginatos) o en la elaboración de productos agropecuarios, así como para el consumo humano (comercializadas como *kombu*). Los alginatos son compuestos con propiedades gelificantes, espesantes y estabilizantes, con numerosas aplicaciones en el sector alimentario, farmacéutico y textil. La industria agropecuaria ha empleado estas algas en la fabricación de fertilizantes y piensos, o bien las ha aprovechado directamente como abono orgánico o forraje para animales. También pueden aprovecharse para la producción de biocombustibles, en concreto, de bioetanol.

El uso de las laminarias como alimento humano tiene una larga tradición en Asia, donde son muy apreciadas. En Europa, su consumo está menos extendido, aunque en los últimos años existe un interés creciente por estos y otros vegetales marinos (denominados «verduras del mar»), debido a sus excelentes propiedades nutricionales y de sabor.

En este contexto, resulta primordial recordar que los recursos naturales de las laminarias son limitados y su aprovechamiento a escala industrial depende del desarrollo de su cultivo. La acuicultura marina, o maricultura, de estas macroalgas es viable con técnicas sencillas y de bajo coste. La que se practica en la actualidad en el sudoeste asiático tiene una enorme relevancia comercial a escala mundial, con una producción anual de unos 8 millones de toneladas. En Europa, dada su creciente demanda para diferentes usos, se están creando nuevas líneas de investigación para adaptar las técnicas de cultivo asiáticas a las especies de laminarias nativas y a las condiciones específicas de sus costas.

EL CULTIVO DE LA LAMINARIA se desarrolla en varias etapas a lo largo de un año. En el laboratorio, las esporas germinan en botellones de cultivo y se forman los gametófitos ❶. Una vez sembrados sobre hilos ❷, los gametófitos se fecundan y dan lugar a jóvenes esporófitos ❸. En el mar se fijan los hilos repletos de pequeños esporófitos, o plántulas, a cabos de cultivo ❹. Estos cabos se colocan en una estructura flotante a base de cuerdas y boyas (parque de cultivo) ❺; sobre esta se desarrollan las frondes ❻, que se cosechan en primavera, cuando han alcanzado su talla adulta ❼.

Beneficios económicos y ambientales

Además de desempeñar una importante función en los ecosistemas marinos costeros, las laminarias, como cualquier vegetal, contribuyen a reducir el dióxido de carbono de la atmósfera y, por consiguiente, a mitigar el calentamiento global. Asimismo, reciclan los residuos inorgánicos (nitratos, amonio y fosfatos) generados



EL CULTIVO CONJUNTO de peces ❶, mejillones ❷ y algas laminarias ❸ en la ría de Ares y Betanzos (La Coruña), constituye un ejemplo de acuicultura multitrófica integrada. Los mejillones en las bateas procesan y extraen del agua los residuos orgánicos generados por los peces cultivados en jaulas, mientras que las macroalgas hacen lo propio con los nutrientes inorgánicos disueltos. Este sistema reduce la carga de compuestos orgánicos e inorgánicos en el medio natural, por lo que actualmente se considera la base para una acuicultura marina más sostenible. En primer plano se observan los colectores de semillas de mejillón ❹, que se colocarán más tarde en las bateas.

por las actividades humanas, que se vierten al medio marino a través de efluentes urbanos, agrícolas e industriales. Por todo ello, su cultivo proporciona importantes beneficios ambientales.

Por otro lado, estas algas resultan básicas para el desarrollo de una acuicultura sostenible de otras especies, como mejillones y peces, porque absorben parte de los desechos que estos animales generan. En concreto, los mejillones extraen y procesan la materia orgánica en suspensión que producen los peces, mientras que las macroalgas absorben los nutrientes inorgánicos disueltos procedentes de los mejillones y peces, así como de los piensos empleados para alimentarlos. Tal asociación de organismos de niveles tróficos diferentes en un sistema de policultivo se conoce como acuicultura multitrófica integrada (AMTI), una forma de explotación que es promovida en España por diferentes instituciones, como es el caso de la Xunta de Galicia en la Estrategia Gallega de Acuicultura. En otros países europeos, como Noruega y Gran Bretaña, están desarrollándose con éxito diversas experiencias de AMTI.

En la actualidad, el Instituto Español de Oceanografía (IEO), en Santander, dispone de las técnicas y conocimientos necesarios para la maricultura a gran escala de laminarias, entre ellas la especie autóctona *Saccharina lattisima* (*kombu* de azúcar). El ciclo biológico de esta alga se caracteriza por la alternancia de dos generaciones: el gametófito, formado por filamentos microscópicos que producen gametos, y el esporófito, constituido por una fronde macroscópica que genera las esporas. La producción del alga exige realizar una primera fase de cultivo en el laboratorio con el fin de obtener jóvenes esporófitos (plántulas), que luego serán cultivados en el mar. En esta fase inicial se hacen crecer primero gametófitos en cámaras bajo condiciones ambientales controladas para la obtención de plántulas sobre hilos. En una segunda fase, estos hilos con jóvenes esporófitos (llamados «semillas») se implantan sobre cabos, que son colocados en una estructura flotante (el parque de cultivo) construida con cuerdas y boyas. Las plántulas se desarrollan en el mar durante unos cinco meses, hasta que alcanzan una talla de aproximadamente un metro y medio.

En la última década, investigadores del IEO, en colaboración con distintos organismos públicos y empresas, han llevado a cabo ensayos de cultivo de laminarias a escala preindustrial en Galicia. Se ha obtenido una producción media de unos 16 kilogramos de peso fresco por metro de cuerda, es decir, unas 40 toneladas por hectárea de cultivo.

Además, el IEO dispone de un banco de germoplasma, o «semillas», de algas laminarias que han sido seleccionadas desde los años noventa con diferentes criterios, entre otros, un rápido crecimiento de los esporófitos y resistencia de estos a altas temperaturas. Este banco es único y posee un gran valor, ya que puede proporcionar plántulas no solo para el cultivo comercial, sino también para la repoblación de las zonas costeras degradadas.

A la vista de los resultados de nuestras investigaciones, podemos concluir que la maricultura de laminarias en las costas atlánticas españolas, además de suministrar productos de alto interés comercial, permitiría mantener una acuicultura sostenible, al tiempo que ofrecería un servicio ambiental muy importante para los ecosistemas marinos.

—César Peteiro
Centro Oceanográfico de Santander
Instituto Español de Oceanografía
—Manuel García Tasende
Consejería del Medio Rural y del Mar
Xunta de Galicia

PARA SABER MÁS

Economic seaweeds of Galicia (NW Spain). M. García Tasende y L. M. Rodríguez González en *Thalassas*, vol. 19, n.º 1, págs. 17-25, 2003.

Biomass yield and morphological features of the seaweed *Saccharina latissima* cultivated at two different sites in a coastal bay in the Atlantic coast of Spain. C. Peteiro y Ó. Freire en *Journal of Applied Phycology*, vol. 25, n.º 1, págs. 205-213, febrero de 2013.

Un análisis crítico sobre el uso de macroalgas como base para una acuicultura sustentable. A. H. Buschmann et al. en *Revista Chilena de Historia Natural*, vol. 86, n.º 3, págs. 251-264, septiembre de 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Hacia una acuicultura más sostenible. Erik Vance en *IyC*, junio de 2015.

ÓPTICA

Microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz

Principios, ventajas y potencial de la técnica declarada método del año 2014 para la investigación biológica

ERNST H. STELZER

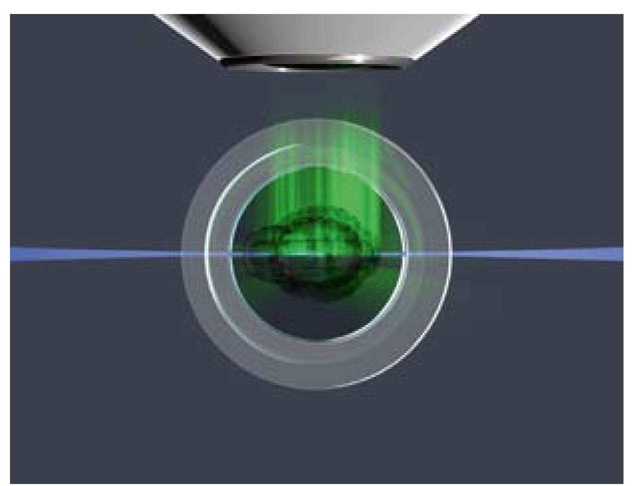
Presentamos en este artículo una de las técnicas microscópicas más novedosas y prometedoras en el campo de la biología celular, del desarrollo y de sistemas. Para comprender la importancia de las mejoras que esta ofrece, comenzaremos repasando las ineficiencias y dificultades que entrañan las técnicas tradicionales.

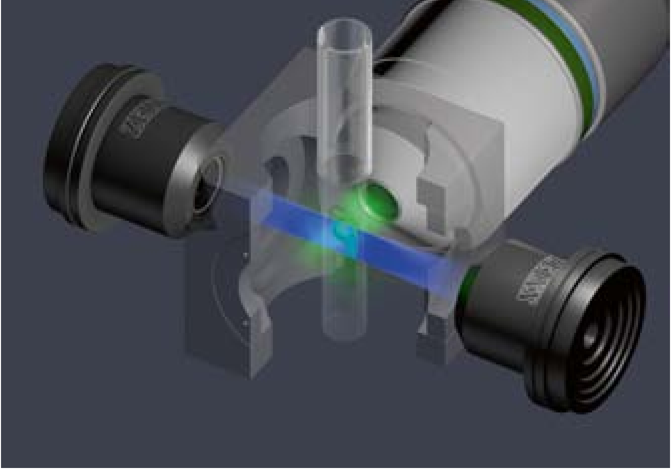
La microscopía mediante luz transmitida —la del microscopio clásico— muestra una visión completa de la morfología de los especímenes biológicos. La microscopía de fluorescencia (basada en el empleo de marcadores fluorescentes) nos permite dar un paso más y estudiar sistemas más concretos como órganos, orgánulos o macromoléculas; además, muestra las zonas de interés brillantes sobre un fondo oscuro, por lo que ofrece un buen contraste. Pero no todo son ventajas.

La microscopía de epifluorescencia estándar (la de campo amplio y la confocal) utiliza la misma lente tanto para excitar los marcadores (fluoróforos) como para capturar la fluorescencia emitida. La luz pasa primero a través del espécimen y excita el mismo número de fluoróforos en cada plano focal a lo largo del eje óptico (se supone que la distribución de estas moléculas es uniforme). De esta forma, cada vez que el microscopio se enfoca en un plano, en realidad excita también todos los fluoróforos del espécimen, incluidos los de los planos superiores o inferiores al plano focal.

La capacidad del microscopio de fluorescencia confocal de producir un seccionado óptico (una suerte de «corte virtual» del espécimen) se basa en la eliminación de la fluorescencia procedente de los planos fuera de foco mediante el uso de un pequeño orificio (*pinhole*) colocado cerca del detector. La excitación de los fluoróforos y la detección de los fotones de fluorescencia generados son eventos independientes [*véase* «Microscopía confocal», por Jeff W. Lichtman; Investigación y Ciencia, octubre de 1994]. Aunque la intensidad de la excitación se conserva a lo largo del eje óptico, la de la emisión de fluorescencia (proporcional al cuadrado de la intensidad de excitación) no: presenta un máximo en el plano focal. Solo aquellos instrumentos ópticos cuya detección de la intensidad de fluorescencia depende del producto de dos eventos independientes tendrán la capacidad de producir seccionado óptico y, por tanto, ofrecerán resolución axial. En otras palabras, los microscopios de fluorescencia de campo amplio no poseen resolución axial.

Para hacer las cosas más difíciles, la microscopía de fluorescencia presenta varias limitaciones básicas. Por un lado, la luz de excitación es absorbida no solamente por los marcadores, sino también por muchos otros compuestos orgánicos que, lo mismo que aquellos, se degradan (son fotoblanqueados) y, por tanto, dejan de estar disponibles para los procesos metabólicos vitales. El proceso es fototóxico. Por otro lado, el número de marcadores en un elemento de volumen a un tiempo dado es finito, por lo que el número de fotones de fluorescencia emitidos y que pueden ser capturados es limitado. Además, la vida en la Tierra está adaptada al flujo de luz solar, el cual es menor que 1,4 kilovatios por metro cuadrado (kW/m^2); ello indica que, en la observación de procesos biológicos dinámicos, la irradiancia en la muestra no debería ser mayor que 1 nW/µm^2 = 100 mW/cm^2 (*véase el recuadro* «¿A cuánta luz podemos exponer una muestra biológica?»).





EL MICROSCOPIO DE LSFM ilumina la muestra con una fina hoja de luz (*azul*) que causa la excitación selectiva de las moléculas marcadoras (fluoróforos) alojadas en el plano enfocado. La fluorescencia que estas emiten es detectada luego por otra lente, situada en una dirección perpendicular a la de excitación (*verde*). La hoja de luz opera así como una suerte de «bisturí» virtual que, sin cortar la muestra, permite obtener una imagen del interior de la misma (seccionado óptico).

CORTESÍA DE ZEISS

¿A CUÁNTA LUZ PODEMOS EXPONER UNA MUESTRA BIOLÓGICA?

Cualquier investigador que haya trabajado con microscopía de fluorescencia, o incluso con microscopía de luz transmitida, es consciente de los efectos negativos de la iluminación en los especímenes estudiados. ¿Cuál sería el límite de irradiancia recomendable? Si bien no se conoce una norma general, sí sabemos que los efectos fototóxicos son más intensos a longitudes de onda cortas que a longitudes de onda largas; que la presencia de marcadores (fluoróforos) ejerce un notable impacto negativo, y que es mejor trabajar con una iluminación de baja intensidad y energía. Si tenemos en cuenta que muchas moléculas orgánicas también absorben la luz de excitación sin emitir fluorescencia y que se degradan, es muy probable que cualquier observación de especímenes biológicos deba realizarse con niveles de radiación que eviten incluso un fotoblanqueo moderado.

Hallamos una posible pista para responder a la pregunta inicial en la energía que recibimos del Sol (constante solar), la cual tiene un valor de 1,4 kilovatios por metro cuadrado (kW/m^2) en el ecuador y aproximadamente 1 kW/m^2 en Europa central. En términos microscópicos, esto equivale a 1 $nW/\mu m^2$ o 100 mW/cm^2. Por tanto, teniendo en cuenta un tiempo máximo de exposición de 500 segundos, la máxima exposición radiante debería ser de unos 0,5 $\mu J/\mu m^2$. De esto es posible inferir (si suponemos que el diámetro de una célula es de unos 100 micrómetros y el de un embrión 900 micrómetros) que las células no deberían exponerse a más de unos cuantos milijulios y los embriones a no más de unos cientos de milijulios.

Muy pocos microscopios pueden operar a esos niveles de energía tan bajos, es decir, en el régimen de exposición de «un sol». El de microscopía de fluorescencia de hoja de luz es uno de ellos. (Los microscopios de fluorescencia confocal y los de superresolución suelen operar en el régimen de «múltiples soles».)

Por tanto, siempre que tengamos que recurrir a la microscopía de epifluorescencia nos enfrentaremos a dos retos. Primero, tanto los fluoróforos como los especímenes se desperdiciarán durante la observación. Segundo, todos los fluoróforos del espécimen y muchos de sus compuestos orgánicos serán excitados aunque se pretenda observar solo una sección. (La situación se vuelve aún más difícil cuando nos proponemos estudiar el comportamiento de varios fenómenos en la muestra, en tres dimensiones y en función del tiempo.) ¿Cómo podemos solucionar estos problemas técnicos?

Una opción menos agresiva y más eficaz

La microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz (LSFM, de *light sheet fluorescence microscopy*) constituye la mejor opción a fecha de hoy. Permite llevar a cabo un seccionado óptico, proporciona buena resolución axial, reduce el fotoblanqueo y la fototoxicidad, permite grabar millones de píxeles en paralelo y mejora drásticamente la viabilidad del espécimen.

El microscopio de LSFM se basa en dos trayectorias ópticas principales: la de excitación y la de detección. En la segunda se encuentran el objetivo de detección, un filtro espectral (que discrimina la luz de excitación), la lente de tubo y la cámara. La primera es perpendicular a la de detección y corresponde a la hoja de luz que se dirige hacia el interior del espécimen. La hoja de luz y el plano focal del objetivo de detección se superponen.

Dado que el grosor de la hoja de luz es menor que la profundidad de campo de las lentes de detección con aperturas numéricas bajas y no mucho mayor que las de apertura numéricas altas, esta hoja de luz iluminará solo un fino cuboide alrededor del plano focal en la trayectoria de detección (la «apertura numérica» es un número adimensional que guarda relación con la cantidad de luz emitida o captada; cuanto mayor es la apertura numérica, mayor el poder de resolución de la lente). Ello significa que se excitan solo los fluoróforos contenidos en el plano focal de la lente de detección, lo cual entraña consecuencias de suma importancia: los marcadores alojados fuera del fino volumen, al no ser excitados, no generan luz fuera de foco (lo que resultaría en una imagen borrosa) y no se fotoblanquean. Por la misma razón, las moléculas orgánicas potencialmente excitables que se hallen fuera de este volumen no se degradan y el espécimen no es afectado por la fototoxicidad.

Por otro lado, la LSFM permite obtener imágenes en 3D —un recurso de gran interés para el estudio de especímenes biológicos—. Estas se construyen a partir de la recopilación de las imágenes de diferentes planos sobre el eje óptico de detección, que se generan normalmente mediante el desplazamiento (o la rotación) del espécimen a través de la hoja de luz. Para obtener con otras técnicas una imagen tridimensional de calidad similar, un pez cebra debe exponerse a una luz 300 veces más energética en el caso de un microscopio estándar y cerca de 5000 veces más con un microscopio confocal de fluorescencia.

Asimismo, el microscopio de LSFM puede paralelizar de forma masiva la adquisición de datos y beneficiarse de los recientes —y probablemente futuros— desarrollos de las cámaras modernas. Ello no sucede, en cambio, en otros métodos que no introducen seccionado óptico en la excitación. Por ejemplo, un microscopio confocal de fluorescencia muestrea el espécimen con un único punto de luz limitado por difracción y lo graba de manera independiente del resto. Cualquier variación que resulte en una paralelización de dicho proceso, como la microscopía confocal de fluorescencia mediante discos giratorios (*spinning disk*), pierde resolución axial.

Un interesante y particular método propuesto por Eric Betzig (ganador del premio Nobel de química en 2014, junto con Stefan W. Hell y William E. Moerner, por el desarrollo de la microscopía de fluorescencia de super resolución) y sus colaboradores, publicado en *Science* en octubre de 2014, combina LSFM y el concepto de iluminación coherente estructurada. Cambiando los haces gaussianos por haces Bessel (que se mantienen enfocados a lo largo de distancias mayores), logran reducir el grosor de la hoja de luz. Esto hace que la LSFM resulte de gran utilidad para la observación de especímenes delgados. En su estudio, Betzig consigue observar capas de una o dos células, y el volumen superficial de especímenes gruesos. La resolución alcanzada en este caso es equiparable a la de un microscopio confocal de fluorescencia, pero la velocidad de grabación de la imagen, el número de imágenes que pueden grabarse y el tiempo de visualización son notablemente superiores.

Los orígenes

Lo mismo que los puntos de luz, las hojas de luz vienen empleándose desde hace

Ventajas de la microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz respecto de las técnicas tradicionales

Propiedad	Mejora
Se ilumina solo el plano de observación	• Capacidad de seccionado óptico y resolución axial • Escaso degradado (fotoblanqueo) del marcador • Baja fototoxicidad (mejora la viabilidad del espécimen)
La cámara graba la intensidad de la fluorescencia	• Detección en paralelo masiva (millones de píxeles por imagen) • Tiempos de exposición reducidos (de micro a milisegundos por imagen) • Grabación rápida (entre 10 y 1000 imágenes por segundo) • Amplia gama de grises (miles de niveles) • Permite trabajar con dos pulsos de luz muy seguidos (compuerta temporal, *time gating*) • Ultrarrápida (decenas de miles de imágenes)
Se reduce el fotoblanqueo del marcador	• Períodos de observación más largos (días o semanas en lugar de horas) • Tiempo de muestreo mejorado (más imágenes) • Visualización con múltiples vistas (de 2 a 8 direcciones por espécimen)
Más fotones por píxel	• Mayor cociente señal/ruido (mejor procesamiento de las imágenes) • Visualizaciones con intervalos más cortos (más imágenes por segundo) • Mayor resolución • Procesamiento de imágenes en 3D simplificado

más de un siglo. Pero no fue hasta la aparición del láser, a principios de los años sesenta, cuando fue posible enfocar al límite de difracción tanto las hojas como los puntos de luz. Un microscopio confocal de fluorescencia (el cual se basa en la iluminación secuencial del espécimen mediante un punto de luz limitado por la difracción) no habría sido posible sin el láser, el cual resulta esencial para conseguir un seccionado óptico.

Los dispositivos basados en hojas de luz, incluidos los macroscopios (diseñados para la observación de muestras voluminosas, de varios centímetros), ya se construyeron en el pasado, pero su capacidad para operar a escala microscópica no se conocía hasta que, alrededor de 2002, en mi grupo del Laboratorio de Biología Molecular Europeo describimos un microscopio de fluorescencia basado en hojas de luz láser enfocadas al límite de difracción. Lo aplicamos a la observación de muestras biológicas vivas y evaluamos sus capacidades para visualizar múltiples vistas. (El trabajo era el resultado de un estudio iniciado a principios de los años noventa, en el que evaluamos de forma sistemática microscopios limitados por difracción que utilizaban entre dos y cuatro lentes.)

Un futuro prometedor

La LSFM ya está aquí y continuará revolucionando la microscopía de fluorescencia. Se basa en un arreglo óptico extremadamente sencillo pero a la vez ingenioso y eficaz. Mediante el uso de los nuevos avances técnicos en las cámaras es posible grabar hasta mil imágenes por segundo. La resolución de la LSFM es equiparable a la de un microscopio confocal de fluorescencia, pero el cociente señal/ruido es unos dos órdenes de magnitud mayor. La LSFM también reduce la energía depositada en el espécimen de 2 a 4 órdenes de magnitud, de tal manera que tanto el fotoblanqueo como la fototoxicidad disminuyen de forma notable. Además, las muestras biológicas (embriones, plantas y secciones de tejidos) sobreviven a sesiones de grabado de millones de imágenes. Los especímenes pueden observarse a lo largo de varias direcciones y, dado que la técnica se adapta a cualquier cámara, puede implementarse junto con otras técnicas, como la espectroscopía mediante correlación de fluorescencia (FCS, de *fluorescence correlation spectroscopy*), la transferencia de energía mediante fluorescencia resonante (FRET, de *fluorescence resonant energy tranfer*) o la microscopía mediante medición del tiempo de vida de la fluorescencia (FLIM, de *fluorescence lifetime imaging*), y todo esto con velocidades, duraciones y calidades sin precedentes.

La LSFM ya está aquí y continuará revolucionando el procesamiento de imágenes a gran escala. Permite grabar múltiples vistas en diversos canales, así como también las miles de imágenes necesarias para reconstruir digitalmente la evolución de un proceso biológico tridimensional en función del tiempo durante horas, días y, en algunos casos, semanas. Los millones de imágenes pueden grabarse en tiempos relativamente cortos a pesar de que la cantidad de datos puede fácilmente llegar a las decenas de terabytes.

La LSFM ya ha influido en la forma en que los biólogos preparan las muestras. La microscopía tradicional de fluorescencia ha forzado a que ciertos esquemas de preparación se realicen en superficies planas y duras. La LSFM pone la muestra en el centro y acomoda la óptica de observación alrededor de la misma. Los especímenes pueden prepararse en nuevas e imaginativas maneras, se mantiene su integridad tridimensional y pueden someterse a experimentos hasta ahora considerados imposibles. Asimismo, al preservar mejor la viabilidad de las muestras, la «técnica del año» amplía nuestros horizontes en la investigación de especímenes. Permite estudiar especímenes multicelulares voluminosos con estructuras complejas bajo condiciones fisiológicamente relevantes. Los embriones pueden sobrevivir a más de 50 horas de observación o hasta alcanzar la fase de adultos fértiles. El microscopio de LSFM deberá ser el instrumento de elección para los aspectos cuantitativos y, por consiguiente, para la obtención de los datos requeridos en estudios biológicos con un enfoque físico.

Por fin, no debemos olvidar que el deber de cualquier nuevo método no es el de repetir experimentos antiguos, sino hacer las cosas de manera diferente, buscar nuevas respuestas y replantearse las ideas del pasado. El hecho de que en la LSFM los especímenes deban prepararse de manera diferente no debe verse como un problema, sino como un reto y una oportunidad. Tampoco debería considerarse un inconveniente el gran número de imágenes generadas, sino parte de la respuesta a nuestra empresa de ahondar en la comprensión de los procesos biológicos. Cuando observamos las células a lo largo del desarrollo de un embrión, el gran número de trazos espaciotemporales resultantes no debe ser visto como una fuente de confusión, sino como una sólida base para comprobar nuestros modelos biológicos basados en estrictos modelos físico-matemáticos. A pesar de que las aplicaciones biológicas de la LSFM no han hecho más que empezar, ya han marcado una gran diferencia.

—*Ernst H. Stelzer*
Instituto Buchmann para las Ciencias de la Vida Molecular
Universidad Goethe de Fráncfort del Meno

Adaptación del artículo publicado en el dossier «Method of the year 2014» de *Nature Methods*, vol. 12, n.º 1, enero de 2015. Traducido con el permiso de

PARA SABER MÁS

Optical sectioning deep inside live embryos by selective plane illumination microscopy. J. Huisken et al. en *Science*, vol. 305, págs. 1007-1009, 2004.
Reconstruction of zebrafish early embryonic development by scanned light sheet microscopy. P. J. Keller et al. en *Science*, vol. 322, págs. 1065-1069, 2008.
Light dose is a limiting factor to maintain cell viability in fluorescence microscopy and single molecule detection. M. Wagner et al. en *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 11, págs. 956-966, 2010.

EN NUESTRO ARCHIVO

El desarrollo tumoral a través del microscopio. Omar E. Olarte, Jordi Andilla y Pablo Loza Álvarez en *IyC*, julio de 2015.

ÓPTICA

El desarrollo tumoral a través del microscopio

La versatilidad de la microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz permite ahondar en la comprensión de los tumores

OMAR E. OLARTE, JORDI ANDILLA Y PABLO LOZA ÁLVAREZ

Cuando se quieren estudiar sistemas biológicos de gran tamaño y complejidad (organismos o tejidos), los métodos de microscopía tradicionales presentan ciertas limitaciones: baja profundidad de penetración, escaso contraste, poca resolución y elevada fototoxicidad. Se requiere, pues, el desarrollo de técnicas alternativas que permitan observar procesos rápidos, en tres dimensiones, con una resolución espacial elevada y sobre campos de visión cada vez más amplios.

Una de esas alternativas la ofrece la microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz o LSFM (de *light sheet fluorescence microscopy*). Se trata de una técnica tan versátil y prometedora que ha sido considerada «método del año 2014» por la revista *Nature Methods*. Una de sus ventajas características es la posibilidad de generar una hoja de luz mediante el movimiento en una dirección de una línea de luz, en cuyo caso pasa a denominarse DSLM (de *digitally scanned light sheet microscopy*). Esta modalidad de generación de la hoja de luz abre un gran abanico de opciones técnicas, lo cual reviste suma importancia, ya que la posibilidad de adaptarse a las características de cada muestra permite obtener mayor información de la misma.

En la unidad de microscopía de superresolución y nanoscopía del Instituto de Ciencias Fotónicas (ICFO), se desarrollan e implementan varias modalidades de LSFM. Cada una combina de forma distinta varios métodos avanzados de imagen.

Mayor penetración en los tejidos

Una de las modalidades con las que trabajamos en el ICFO se basa en la combinación de la DSLM con la excitación de fluorescencia de dos fotones, o TPEF (de *two-photon excited fluorescence*); hablamos entonces de 2p-DSLM. En este caso, se utilizan láseres de pulsos ultracortos (de unos 100 femtosegundos de duración) enfocados, cuya emisión se produce normalmente en el infrarrojo cercano.

¿Cómo puede una radiación infrarroja generar fluorescencia en el visible si la primera es menos energética que la segunda? La clave reside en que para emitir un fotón de fluorescencia deben absorberse dos fotones infrarrojos —de ahí el nombre de la técnica—, consiguiendo así la energía necesaria para generar fluorescencia. Ello es posible porque este tipo de láseres logra una gran densidad de fotones en el punto focal. Por un lado, se emplean pulsos de cortísima duración y, por tanto, con una gran cantidad de fotones (cuanto más corto es un pulso, más denso). Por otro, al tratarse de un haz enfocado, los fotones se ven confinados en un espacio muy reducido. Estos dos factores (confinación en el tiempo y en el espacio) hacen que en el punto focal exista una elevada densidad de fotones y, por tanto, una mayor probabilidad de que se produzcan excitaciones mediante dos fotones —algo poco probable en condiciones normales.

Una de las principales ventajas de la 2p-DSLM es que permite una gran profundidad de penetración en tejidos vivos. Ello se debe a que las longitudes de onda del infrarrojo cercano caen justamente en la ventana óptica de transmisión de las muestras biológicas. Además, al ser una longitud de onda larga (en comparación con la del visible), presenta un menor esparcimiento (o dispersión). Si a ello añadimos el hecho de que la fluorescencia se genera solo en el punto de enfoque, el resultado son imágenes más nítidas y con menos ruido.

Un campo de visión más amplio

La técnica DSLM ofrece otra ventaja: no se halla limitada a los haces de excitación estándar, es decir, gaussianos. Ello permite trabajar con otro tipo de haces, cuyas propiedades ópticas mejoran la calidad de la imagen obtenida.

Un ejemplo de haces alternativos corresponde a los de tipo Bessel. Estos suelen producirse mediante una lente en forma de cono (axicón) y tienen la peculiaridad de que, en comparación con los haces gaussianos, se mantienen enfocados a lo largo de distancias más largas, además de ser menos sensibles al esparcimiento. Ello permite aumentar el campo de visión disponible en DSML.

Si combinamos las modalidades que acabamos de explicar con la LSFM estándar, obtenemos un sistema óptico muy versátil en el que coexisten la DSLM y la 2p-DSLM, y sus variantes con haces Bes-

LOS ESFEROIDES MULTICELULARES TUMORALES, excelentes modelos del desarrollo tumoral, son difíciles de estudiar mediante un microscopio estándar. En cambio, la técnica 2p-DSLM (*izquierda*) y, sobre todo, la 2p-DSLM-Bessel (*centro*), que amplía el campo de visión, sí ofrecen imágenes de calidad de este tipo de muestras biológicas. En concreto, permiten visualizar con buen contraste las estructuras de cromatina (*inserto*) en los núcleos, lo que facilita el estudio de la proliferación celular en las distintas capas del esferoide y, por tanto, ahondar en la comprensión del desarrollo tumoral.

sel, es decir, DSLM-Bessel y 2p-DSLM-Bessel. Veamos su aplicación al estudio del desarrollo tumoral.

Observar la proliferación celular

En nuestro laboratorio hemos utilizado la microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz para estudiar los esferoides multicelulares de tumor (MCTS, de *multicellular tumor spheroids*). Se trata de cultivos compuestos por células cancerosas que, al dividirse y multiplicarse, se agregan unas con otras formando un esferoide. Constituyen un excelente modelo para estudiar las interacciones de las células malignas durante la proliferación, diferenciación, apoptosis y expresión génica en tumores.

Cuando los esferoides superan los 0,5 milímetros de diámetro, sus propiedades ópticas de absorción y esparcimiento de la luz dificultan su observación a través de los microscopios clásicos. Ello resulta particularmente crítico en el estudio de la proliferación celular en las capas del esferoide, puesto que es necesario distinguir los diversos estados de condensación de la cromatina en los núcleos de las células en todo el volumen del agregado. En tal caso, aunque se cuente con MCTS modificados genéticamente para que expresen proteínas fluorescentes en la estructura de cromatina, la microscopía estándar no permite observar dicha proliferación a profundidades mayores de 0,2 milímetros.

La LSFM puede ayudarnos a resolver esa dificultad técnica. Pero ¿cuál será la modalidad más indicada? Si recurrimos a un microscopio con 2p-DSLM, obtendremos una buena imagen (con resolución y contraste) de las estructuras de la cromatina, pero perderemos campo de visión. Si optamos por los haces de tipo Bessel, ganaremos campo de visión, pero aumentará el ruido de fondo y empeorará la resolución (estos haces generan anillos de luz concéntricos al haz central, lo que da como resultado un haz más grueso y, por tanto, con menor resolución).

La opción ganadora es precisamente la 2p-DSLM-Bessel, que combina las dos propuestas anteriores. Con la excitación con dos fotones desaparece el efecto de los anillos concéntricos y, en consecuencia, las imágenes son más claras y contrastadas que las obtenidas con otras modalidades.

La mejora es más evidente en las estructuras del centro del esferoide, donde la absorción y el esparcimiento de la luz son mayores. Además, el campo de visión obtenido mediante la combinación 2p-DSLM-Bessel es mucho mayor, con lo que los esferoides pueden visualizarse prácticamente en su totalidad.

El estudio de los esferoides multicelulares de tumor constituye solo un ejemplo de las numerosas aplicaciones biomédicas de la microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz. La posibilidad de examinar muestras de gran tamaño y complejidad con una profundidad de penetración y resolución no alcanzables por los sistemas convencionales de microscopía confieren a esta técnica un futuro prometedor.

Nuestro próximo reto consiste en combinar el microscopio de hoja de luz con la «óptica adaptativa», una técnica muy utilizada por los astrónomos para corregir las aberraciones ópticas introducidas por la atmósfera cuando se ven imágenes estelares producidas con telescopios terrestres. En nuestro caso, las aberraciones son generadas por la muestra misma (el esferoide).

Al implementar esa técnica en nuestro sistema DSLM, esperamos obtener aún mejores imágenes del interior de los esferoides a mayores profundidades de penetración y mayor contraste. Ello permitirá una mejor visualización de los procesos biológicos que ocurren no solo en el interior de los esferoides, sino también en otras muestras de interés biomédico, lo que abrirá la posibilidad de avanzar en otras disciplinas.

—Omar E. Olarte, Jordi Andilla y Pablo Loza Álvarez
Unidad de microscopía óptica de superresolución y nanoscopía
Instituto de Ciencias Fotónicas
Castelldefels, Barcelona

PARA SABER MÁS

Deep and fast live imaging with two-photon scanned light-sheet microscopy. T. V. Truong et al. en *Nature Methods*, vol. 8, págs. 757-760, 2011.

Live cell division dynamics monitoring in 3D large spheroid tumor models using light sheet microscopy. C. Lorenzo et al. en *Cell Division*, vol. 6, pág. 22, 2011.

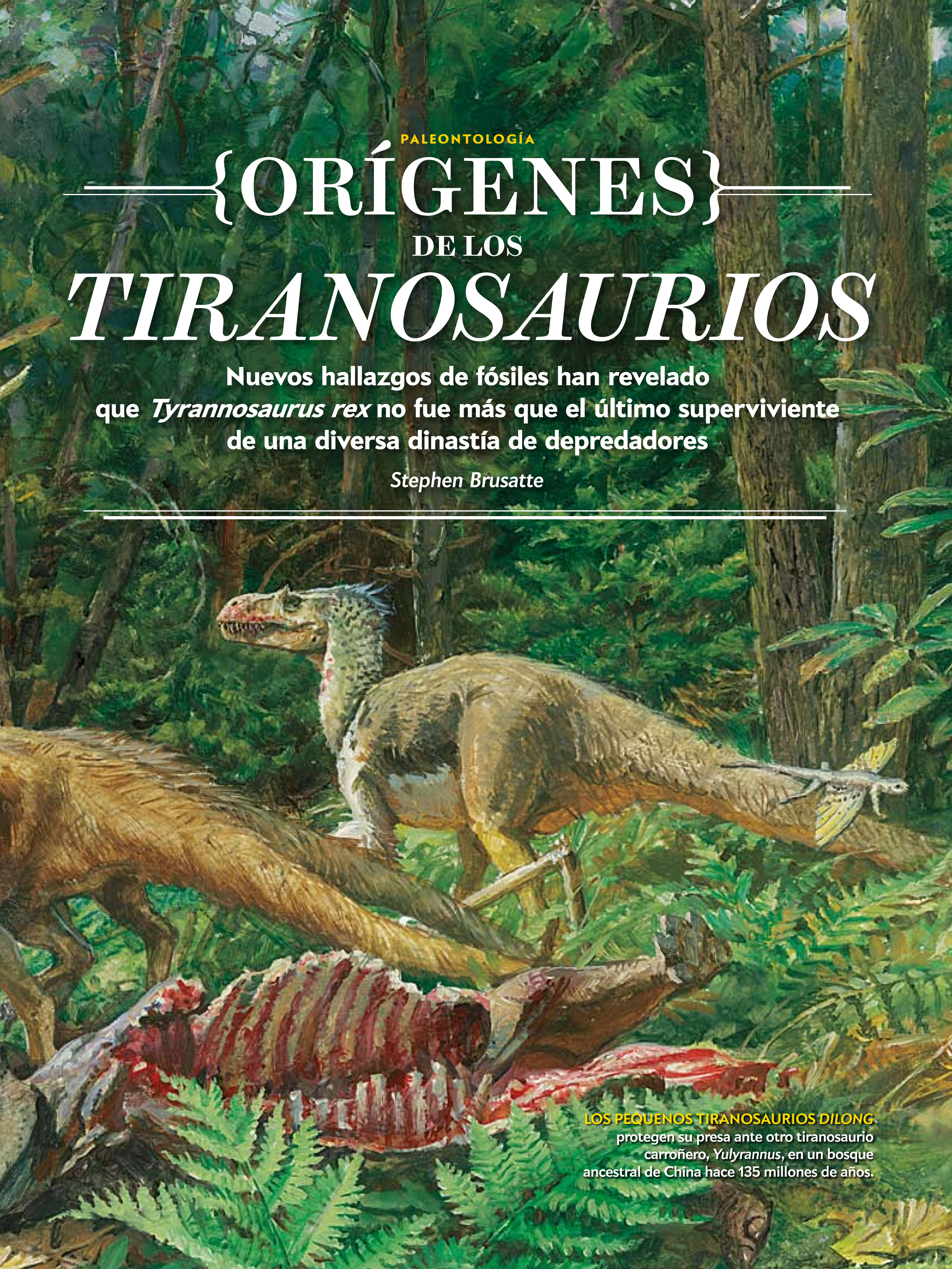
Image formation by linear and nonlinear digital scanned light-sheet fluorescence microscopy with gaussian and Bessel beam profiles. O. E. Olarte et al. en *Biomedical Optics Express*, vol. 3, págs. 1492-1505, 2012.

EN NUESTRO ARCHIVO

Microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz. Ernst H. Stelzer en *IyC*, julio de 2015.


Prensa Científica, S.A.


GURNEY



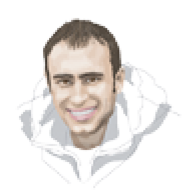
PALEONTOLOGÍA

{ORÍGENES} DE LOS TIRANOSAURIOS

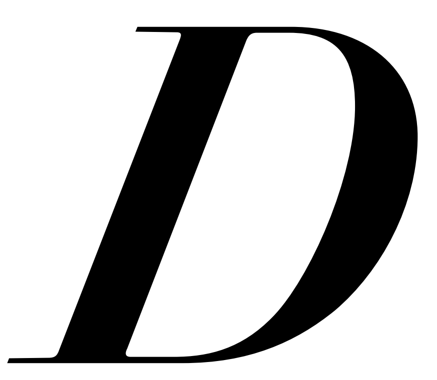
Nuevos hallazgos de fósiles han revelado que *Tyrannosaurus rex* no fue más que el último superviviente de una diversa dinastía de depredadores

Stephen Brusatte

LOS PEQUEÑOS TIRANOSAURIOS *DILONG* protegen su presa ante otro tiranosaurio carroñero, *Yulyrannus*, en un bosque ancestral de China hace 135 millones de años.



Stephen Brusatte, paleontólogo de la Universidad de Edimburgo, centra sus investigaciones en la anatomía y la evolución de los dinosaurios. Es autor de más de setenta artículos científicos y cinco libros de dinosaurios, así como asesor de paleontología para el programa de la BBC *Caminando entre dinosaurios*.



URANTE UN SOFOCANTE DÍA DE VERANO DE 2010, UN OBRERO DE LA CIUDAD DE Ganzhou, en China sudoriental, estaba cavando los cimientos de un edificio cuando su retroexcavadora se topó contra algo duro. Bajó para comprobar de qué se trataba, esperando encontrarse con algún problema técnico: el lecho de roca impenetrable, una vieja cañería de agua o algún otro obstáculo que sin duda retrasaría la finalización del parque industrial en expansión que su empresa se apremiaba por terminar. Pero cuando la suciedad y el polvo se disiparon vio algo muy diferente: huesos. Había una gran cantidad de ellos, algunos enormes.

De hecho, ese día tuvieron que interrumpirse las obras, ya que los huesos resultaron ser un gran descubrimiento. El trabajador había dado con un esqueleto casi completo de una nueva especie de dinosaurio emparentada con *Tyrannosaurus rex*. Unos años más tarde mis colegas chinos me invitaron para que participara en el estudio de este fósil. Y en mayo de 2014 dimos a conocer la última incorporación al árbol de familia de los tiranosaurios: *Qianzhousaurus sinensis*. El nombre científico es como un trabalenguas, así que le asignamos el atrevido apodo de «Pinocho rex», en referencia a su peculiar hocico largo.

Qianzhousaurus forma parte de una oleada de nuevos hallazgos de tiranosaurios que en la última década está transformando la comprensión de este grupo. Desde que se descubriera *T. rex* hace más de un siglo, este gigante de 13 metros de longitud y cinco toneladas de peso ha acaparado todo el protagonismo. Sin embargo, su historia evolutiva permanecía a oscuras. Durante el siglo xx, se hallaron parientes cercanos de *T. rex* de tamaño igualmente extraordinario y se comprendió que el primero no representaba una rareza. Estos grandes depredadores constituyeron una rama propia en el árbol genealógico de los dinosaurios. Pero los paleontólogos deseaban entender cuándo se originaron, a partir de qué formas evolucionaron, y cómo adquirieron su gran tamaño y ocuparon la cima de la cadena trófica. Hasta hace poco, estas preguntas no tenían respuesta.

En los últimos quince años, se ha recuperado una veintena de nuevas especies de tiranosaurios en diferentes yacimientos de todo el mundo, desde los desiertos de Mongolia hasta los páramos helados del círculo polar ártico. Los hallazgos han permitido reconstruir la genealogía de los tiranosaurios y han revelado datos sorprendentes. Resulta que estos carnívoros tuvieron un papel marginal y el tamaño de un humano durante la mayor parte de su historia evolutiva. Solo adquirieron sus enormes dimensiones y el dominio ecológico en los últimos 20 millones de años de la era de los dinosaurios, que comenzó hace unos 250 millones de años y se extendió a lo largo del Triásico, Jurásico y Cretácico. El rey de los dinosaurios, lejos de pertenecer a una dinastía de depredadores gigantes, tuvo en realidad raíces humildes y no era más que el último superviviente de una sorprendente variedad de tiranosaurios que medraron por todo el planeta hasta que el impacto de un asteroide, hace 66 millones de años, llevó la era de los dinosaurios a su fin y marcó el inicio de la era de los mamíferos.

NACE UNA ESTRELLA

La historia de cómo se descubrió la familia de los tiranosaurios comienza con el hallazgo de *T. rex* por Henry Fairfield Osborn, uno de los científicos más conocidos de EE.UU. a principios del siglo xx. Fue presidente del Museo Americano de Historia Natural de la ciudad de Nueva York y de la Academia Americana de las Artes y las Ciencias, y también apareció en la portada de *Time* como figura relevante. Utilizó su notable posición para impulsar sus ideas sobre la eugenesia y la superioridad racial, de ahí que hoy se le considere a menudo un fanático más de un tiempo ya pasado. Pero Osborn era un paleontólogo inteligente y aún mejor administrador científico. Una de sus mejores decisiones consistió en enviar a Barnum Brown, coleccionista de fósiles, al oeste de Estados Unidos en busca de dinosaurios.

Brown era un personaje excéntrico, un hombre que buscaba fósiles en pleno verano cubierto con un abrigo de piel y obtenía ingresos adicionales con servicios de espionaje para Gobiernos y compañías petroleras. Pero también poseía mucha intuición y, en 1902, hizo uno de los descubrimientos más famosos de la historia

PÁGINAS ANTERIORES: ILUSTRACIÓN DE JAMES GURNEY

EN SÍNTESIS

Los paleontólogos conocen la existencia de *T. rex* y otros tiranosaurios gigantes desde hace décadas. Pero no lograban determinar cuándo se originaron ni cuáles fueron sus antepasados, ya que no se habían descubierto fósiles que lo documentasen.

Hallazgos recientes nos han permitido cubrir esta laguna de conocimiento y entender mejor este grupo icónico. Los descubrimientos señalan que los tiranosaurios presentan un origen muy antiguo y humilde.

Además, el grupo gozó de una diversidad mucho mayor de la que imaginaban los expertos, y algunas de sus especies exhibían extrañas características anatómicas.

de la paleontología: halló los restos de un dinosaurio carnívoro gigante en las tierras baldías de Montana.

Cuando el fósil fue descrito unos años más tarde, Osborn le dio un nombre cuya fama ha resistido el paso del tiempo: *Tyrannosaurus rex*, «el rey de los lagartos tiranos». Obtuvo un impacto instantáneo y ocupó los titulares de todo el país. Osborn y Brown habían dado a conocer al depredador terrestre más grande y malvado de toda la historia.

T. rex se convirtió en el dinosaurio por excelencia, la estrella del cine y de exposiciones en museos de todo el mundo. Pero su celebridad escondía un misterio: casi ningún científico del siglo xx sabía dónde situarlo en la historia evolutiva más amplia de los dinosaurios. Era una rareza, mucho mayor y muy diferente de otros dinosaurios depredadores conocidos, lo que hacía difícil ubicarlo en la familia de estos.

Durante las siguientes décadas, otros paleontólogos descubrieron en yacimientos de América del Norte y Asia varios parientes cercanos de *T. rex*. Habían vivido casi en la misma época, a finales del Cretácico, hace entre 66 millones y 84 millones de años. Estos tiranosaurios (*Albertosaurus*, *Gorgosaurus*, *Tarbosaurus*) poseían una enorme semejanza con *T. rex*. Eran depredadores gigantescos que prosperaron durante la última etapa de la historia de los dinosaurios. Pero aunque los fósiles resultaban impresionantes, no contribuían mucho a esclarecer los orígenes del grupo.

INICIOS MODESTOS

Algunos de los descubrimientos recientes que están ayudando a resolver las notables lagunas de nuestro conocimiento sobre los tiranosaurios proceden de lugares imprevistos. En la imagen estereotipada de un hallazgo fósil, los paleontólogos intrépidos recorren rincones remotos del desierto en el oeste de América del Norte, Argentina, el Gobi o el Sáhara, donde desafían el calor, el polvo y las serpientes mientras extraen fósiles entre rocas. Pero ahora los dinosaurios, entre ellos los tiranosaurios, están apareciendo en todo el mundo, incluso en los confines septentrionales de Rusia, donde los paleontólogos deben hacer frente a gélidos inviernos y a veranos húmedos infestados de mosquitos.

Alexander Averianov, del Instituto Zoológico de la Academia de Ciencias de Rusia en San Petersburgo, es uno de estos paleontólogos. En 2010 su equipo anunció un descubrimiento revelador en la vasta región de Krasnoyarsk, en Siberia central. Se trataba de un conjunto de huesos de un pequeño dinosaurio carnívoro, del tamaño de un humano, que vivió mucho antes que *T. rex*, hace unos 170 millones de años, en el Jurásico medio. Lo bautizaron *Kileskus*, que significa «lagarto» en la lengua local. Constituyó una prueba esencial para averiguar el origen de los tiranosaurios.

A primera vista, *Kileskus* no infunde excesivo respeto. Sin duda, no se asemeja en nada a *T. rex*. Si este último hubiera vivido en Rusia durante el Jurásico medio, podría haber aplastado a *Kileskus* como a una mosca, incluso con sus reducidos brazos. Pero *Kileskus* presenta similitudes inequívocas con otro pequeño carnívoro, *Guanlong*, que vivió en China unos 10 millones de años después y fue descrito en 2006. Ambos animales lucían una cresta de hueso en la parte superior del cráneo. Y *Guanlong*, del que se disponen fósiles mucho más completos que de *Kileskus*, poseía características que se observan solo en tiranosaurios, como los huesos nasales fusionados. La concordancia de los rasgos indica que todos ellos se hallaban emparentados. Los modestos y poco recordados *Kileskus* y *Guanlong* pertenecen a la línea ancestral de la que surgió el gran *T. rex*.

Esos dos hallazgos ofrecieron una imagen sorprendente del nacimiento de los tiranosaurios. Revelaron que el origen del grupo no lo formaban superdepredadores imponentes, como imaginaban numerosos investigadores cuando se descubrieron los primeros de ellos, sino carnívoros de segundo o tercer orden que vivían a la sombra de depredadores gigantes de otros grupos, como los alosaurios y los ceratosaurios. Además, el origen de los tiranosaurios se remontaba a mucho antes de lo que nadie esperaba. Vivieron en una época en la que el supercontinente Pangea todavía no se había separado del todo, por lo que los animales podían dispersarse con relativa facilidad a través de las masas de tierra. Esta geografía explica por qué los primeros tiranosaurios han aparecido en Rusia y en China, y también hay especies ligeramente posteriores en EE.UU., Reino Unido y quizás Australia (la filiación taxonómica de algunos dinosaurios depredadores de este país es objeto de debate). Los fósiles también indican que tardaron mucho en volverse dominantes: transcurrió más tiempo entre la existencia de los tiranosaurios ancestrales y *T. rex* (al menos 100 millones de años) que entre la de *T. rex* y los humanos (66 millones de años).

CÁLIDOS Y PLUMOSOS

Aunque los tiranosaurios tardaron en alcanzar proporciones gigantescas, ello no significa que su evolución se detuviese. Cada vez más datos demuestran que el grupo experimentó una considerable diversificación mucho antes de que apareciesen los grandes *Tarbosaurus* y *T. rex*. Ejemplos llamativos de esta proliferación proceden de la provincia de Liaoning, en el noreste de China.

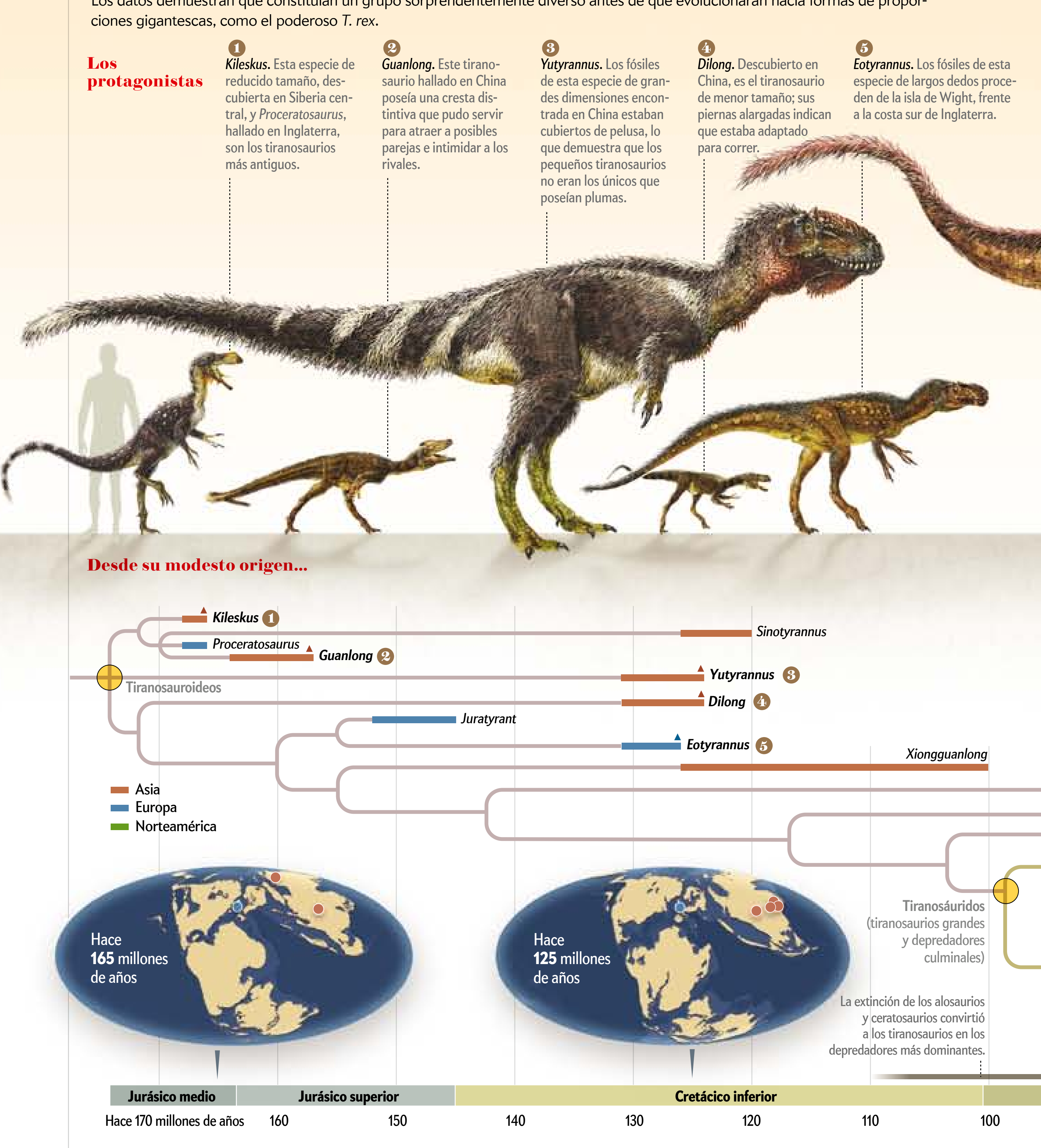
Si el «rey tirano» no era lo bastante temible ya, solo faltaba imaginarlo como un gran pájaro infernal, vigoroso e inteligente

Liaoning no es el lugar más hermoso del mundo. Aunque me crié en las aburridas llanuras del Medio Oeste de Estados Unidos, me resulta difícil mantener los ojos abiertos en el tren que me lleva allí desde Pekín. Durante tres horas y media atravesamos kilómetros y kilómetros de paisaje pedregoso cubierto de neblina y salpicado de pequeñas granjas y chimeneas humeantes. Sin embargo, esta es una tierra santa para los cazadores de fósiles.

Durante las últimas dos décadas, los agricultores de toda esa región han recogido miles de esqueletos de dinosaurios. Repetidas erupciones volcánicas ocurridas hace entre 120 y 130 millones años enterraron rápidamente en ceniza y barro las desafortunadas criaturas y conservaron sus restos de forma excepcional. Entre los numerosos animales que se hallan en esta Pompeya del Cretácico hay dos especies interesantes de tiranosaurios. Xu Xing, del Instituto de Paleontología de Vertebrados y Paleoantropología de Pekín, dio a conocer en 2004 la primera de ellas: *Dilong*. Poseía el tamaño aproximado de un perro *golden retriever*, brazos largos para capturar a sus presas y un esqueleto flexible, con piernas largas, que le dotaría de una gran velocidad. La segunda especie que Xu describió en 2012 era un dinosaurio muy diferente. *Yutyrannus* medía entre ocho y nueve metros de longitud y pesaba cerca de una tonelada; probablemente se

Miembros de una misma familia

En los últimos años, una serie de descubrimientos de fósiles ha contribuido a reconstruir el árbol de la familia de los tiranosaurios. Los datos demuestran que constituían un grupo sorprendentemente diverso antes de que evolucionaran hacia formas de proporciones gigantescas, como el poderoso *T. rex*.



6 *Qianzhousaurus.* Debido a su hocico inusualmente largo, este tiranosaurio recibió el apodo de «Pinocho rex».

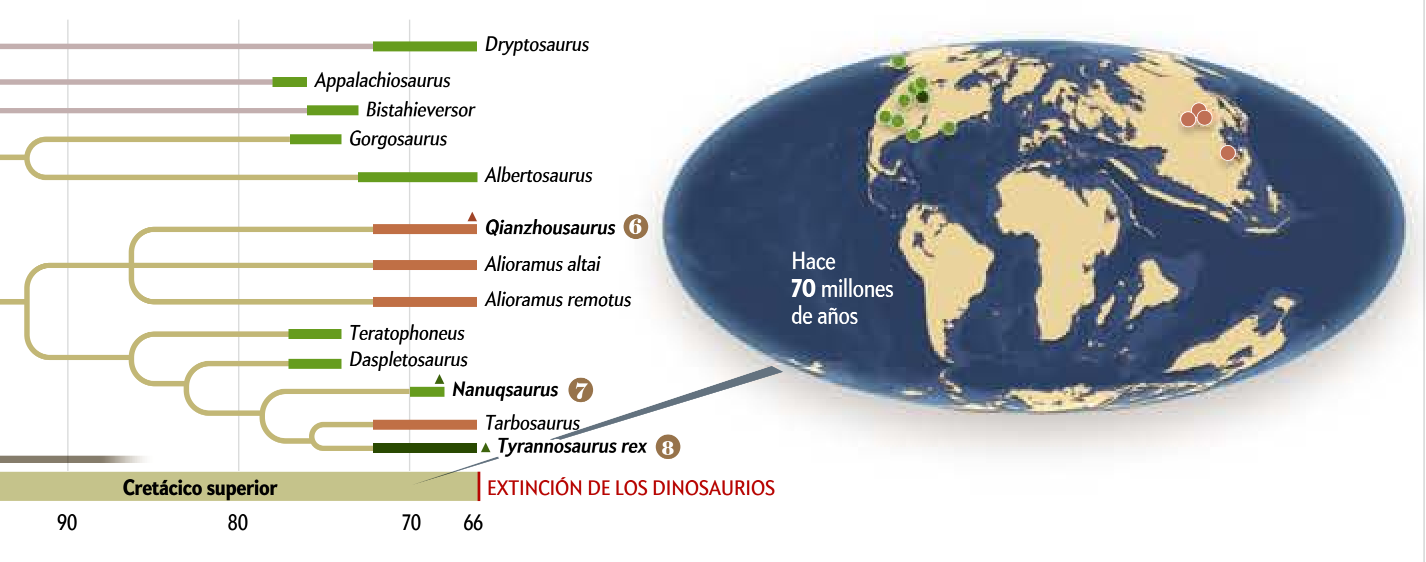
7 *Nanuqsaurus.* El tiranosaurio más septentrional del registro fósil vivió en el Ártico; su tamaño reducido quizá le permitió hacer frente a la escasez de recursos.

8 *Tyrannosaurus rex.* El «rey tirano» fue uno de los depredadores más grandes que ha pisado jamás nuestro planeta, solo igualado por otros dinosaurios de parentesco más lejano.

… hasta convertirse en superdepredadores

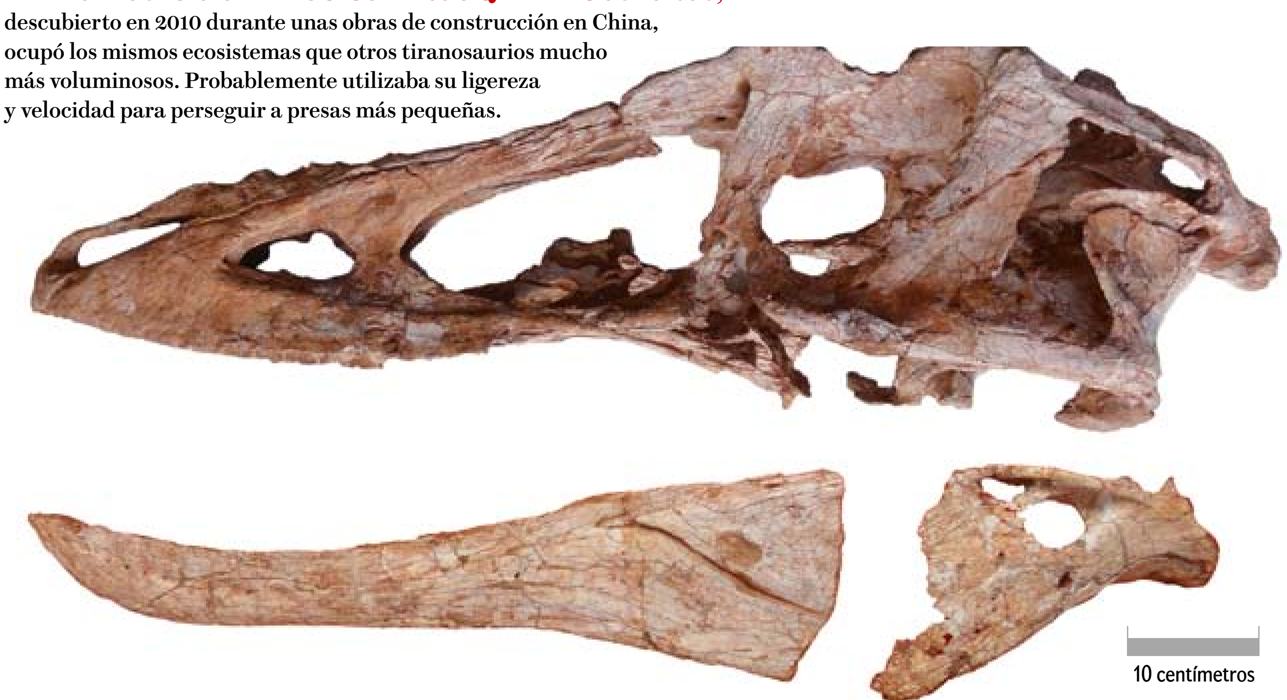
Biogeografía de los tiranosaurios

El registro fósil de tiranosaurios, cada vez más abundante, señala que este grupo se hallaba mucho más extendido de lo que se pensaba, con yacimientos en EE.UU., China, Rusia y, posiblemente, Australia. Pudieron dispersarse tanto porque evolucionaron en una época en que los continentes todavía no se habían separado, lo que facilitó su desplazamiento entre las diferentes masas de tierra.



FUENTE:: C. R. SCOTESE, PROYECTO PALEOMAP, 2009 *(mapas)*; TODD MARSHALL *(dinosaurios)*; 5W INFOGRAPHICS *(gráficos)*

EL TIRANOSAURIO DE HOCICO LARGO *QIANZHOUSAURUS*, descubierto en 2010 durante unas obras de construcción en China, ocupó los mismos ecosistemas que otros tiranosaurios mucho más voluminosos. Probablemente utilizaba su ligereza y velocidad para perseguir a presas más pequeñas.



situaba en la parte más alta de la pirámide alimentaria. Ambos tiranosaurios se hallaron en la misma formación rocosa y pudieron haber convivido hace unos 125 millones de años. Las dos especies, que presentaban los huesos nasales fusionados y otras características distintivas del grupo, demuestran que los tiranosaurios del Cretácico inferior se habían diversificado en una serie de nuevas especies que ocupaban distintos nichos ecológicos y algunos de ellos exhibían un mayor tamaño corporal.

Dilong y *Yutyrannus* también destacan por otra razón. Los paleontólogos imaginaban a los dinosaurios cubiertos de escamas, como grandes reptiles torpes y lentos. Sin embargo, en los últimos años se han hallado pruebas de que diversas especies contaban con una capa de plumón, en lugar de escamas, y eran en general animales más dinámicos e inteligentes de lo que se había pensado. Es decir, se asemejaban más a las aves que a los reptiles. *Dilong* y *Yutyrannus* indican sin lugar a dudas que los tiranosaurios se ajustan a esta segunda descripción. Los huesos de estas especies están cubiertos por una gruesa capa de pelusa, pero no se trata de las plumas pectinadas que poseen los pájaros actuales en las alas, sino de plumas filamentosas que parecen pelo. A diferencia de las aves, los tiranosaurios ciertamente no volaban. En su lugar, tal vez usaban las plumas para exhibirse o mantenerse calientes. La presencia de plumas en ellos y en otros tipos de dinosaurios hace pensar que muy probablemente el gran *T. rex* también estuviese emplumado. Si el «rey tirano» no era suficientemente temible ya, solo faltaba imaginarlo como un gran pájaro infernal, vigoroso e inteligente.

EL DESPERTAR DE LOS REYES

Los nuevos descubrimientos de Rusia, China y otros lugares demuestran que los tiranosaurios prosperaron desde el Jurásico medio hasta el Cretácico inferior. Puede que no fuesen los carnívoros más voraces, pero habían encontrado su nicho ecológico y formaron un grupo estable, aunque no espectacular, de depredadores veloces furtivos. Pero entonces algo cambió. Hace entre 85 millones y 110 millones de años, durante el Cretácico medio, los ecosistemas de los dinosaurios sufrieron una reestructuración drástica. Los alosaurios y los ceratosaurios, que habían ocupado durante mucho tiempo el vértice de la pirámide alimentaria, desaparecieron y los tiranosaurios asumieron el papel de depredador superior en los continentes del hemisferio norte. No sabemos con exactitud qué propició ese cambio, ya que los fósiles de dinosaurios del Cretácico medio son muy escasos. Quizá lo provocó una extinción masiva hace 94 millones años, una época en que las temperaturas ascendieron y los niveles del mar fluctuaron.

Fuera como fuera, cuando alcanzaron la cumbre de la cadena trófica, los tiranosaurios prosperaron. Durante los últimos 20 millones de años del Cretácico, reinaron en América del Norte y Asia como enormes superdepredadores de varias toneladas, con brazos diminutos y enormes cráneos. Poseían una mordedura tan poderosa que podían destrozar los huesos de sus presas. Crecían tan rápido durante la adolescencia que cada día ganaban varios kilos de peso. Y su vida era tan ardua que los paleontólogos todavía no han hallado un individuo que viviera más de treinta años.

Pero aunque los tiranosaurios triunfaron en América del Norte y Asia, no parece que hubieran vivido en Europa o en los continentes del sur, donde proliferaron otros grupos de grandes depredadores. La explicación puede ofrecerla la reconstrucción del clima de la Tierra y la configuración continental durante el Cretácico superior. En esa época, el mundo era muy diferente al que hubo cuando aparecieron los primeros tiranosaurios pequeños. Los continentes se habían separado mucho más y habían alcanzado posiciones similares a las que ocupan hoy en día. Por otra parte, el fuerte ascenso del nivel del mar dividió América del Norte y redujo Europa a un puñado de pequeñas islas. La Tierra de *T. rex* era un planeta muy fragmentado. En consecuencia, los que dominaban en una región no tenían por qué hacerlo en otras, por la sencilla razón de que no podían llegar a ellas.

DIVERSIDAD PERSISTENTE

Uno esperaría que, en las regiones donde los grandes tiranosaurios como *T. rex* se hicieron con el poder, estos habrían elimi-

nado a otros tiranosaurios de menor tamaño. Pero los últimos descubrimientos de fósiles sugieren lo contrario. Algunos de ellos han revelado una diversidad sorprendente de especies en distintos niveles de la pirámide alimentaria, incluso durante los últimos millones de años del Cretácico, cuando dominaban *T. rex* y sus semejantes.

El tiranosaurio con «nariz de Pinocho», *Qianzhousaurus*, hallado en las obras de construcción en China ofrece un buen ejemplo. Cuando en 2013, durante un congreso, Junchang Lü, del Instituto de Geología de la Academia China de Ciencias de la Tierra, me mostró una fotografía del fósil me quedé atónito. Se trataba de un tiranosaurio de la última fase del Cretácico que presentaba notables diferencias respecto al «rey de los dinosaurios». Era claramente más pequeño, entre ocho y nueve metros de largo, y quizás habría pesado una tonelada. Seguía siendo un animal con el que uno no desearía tropezarse en un rincón oscuro del Cretácico, pero parecería un niño en comparación con *T. rex*. Además, su cráneo era extrañamente largo, estrecho y delicado, a diferencia del de sus famosos parientes, que era ancho, musculoso y estaba adaptado para triturar huesos.

Lü me invitó a que colaborara en la descripción del nuevo fósil chino porque yo había estudiado otros dos tiranosaurios de hocico largo, descubiertos décadas antes, que habían desconcertado a los científicos por su peculiaridad. El esqueleto parcial de uno de ellos lo había hallado un equipo ruso en Mongolia en la década de los setenta. Lo denominaron *Alioramus remotus* y pensaron que se trataba de un extraño tiranosaurio de cráneo alargado. Pero durante la Guerra Fría muy pocos paleontólogos pudieron estudiar el fósil, por lo que se mantuvo la duda de si correspondía a una especie nueva o simplemente a un individuo joven del tiranosaurio *Tarbosaurus*. Unas décadas más tarde, en los primeros años del actual milenio, un equipo conjunto de Estados Unidos y Mongolia dirigido por mi supervisor de tesis, Mark Norell, del Museo Americano de Historia Natural, descubrió un fósil mucho más completo y mejor conservado de *Alioramus*. El primer día de mis estudios de doctorado, Norell me llevó al laboratorio del museo, me mostró el esqueleto y me dijo que podía empezar a estudiarlo. En 2009 anunciamos que se trataba de una nueva especie, *Alioramus altai*. El esqueleto era claramente distinto del de *Tarbosaurus*, pero, como pertenecía a un individuo juvenil (según revelaba la estructura interna de los huesos), no podíamos descartar la posibilidad de que sus rasgos singulares fueran consecuencia de un estado incompleto de desarrollo.

En ocasiones, enigmas como ese permanecen sin esclarecer durante décadas antes de que los paleontólogos hallen nuevos fósiles que les permitan salir de dudas. En nuestro caso, se resolvió en unos pocos años gracias al hallazgo azaroso del operario de la retroexcavadora. El esqueleto de *Qianzhousaurus* descubierto en Ganzhou exhibía el mismo hocico largo, la constitución delicada y el tamaño reducido de *Alioramus*, pero sin duda pertenecía a un individuo adulto. Fue la clave que nos llevó a concluir que los tiranosaurios de hocico largo constituían un grupo distinto de especies, vivieron en Asia durante el final del Cretácico y probablemente eran depredadores de segundo nivel en la cadena trófica, por debajo del titánico *Tarbosaurus*.

Qianzhousaurus no fue el único tiranosaurio de tamaño modesto que coexistió con otros pesos pesados. Tan solo dos meses antes de que publicáramos nuestra descripción de *Qianzhousaurus*, Anthony Fiorillo y Ronald Tykoski, ambos del Museo Perot de Naturaleza y Ciencia, en Dallas, describieron un tiranosaurio aún más extraño, *Nanuqsaurus*, que vivió durante el Cretácico en las tierras heladas del círculo polar ártico en Alaska. De él se conocen solo unos pocos huesos que se asemejan mucho a los de *T. rex*, pero con una diferencia extraordinaria: presentan la mitad de su tamaño. La explicación más probable era que el fósil perteneciera a un tiranosaurio recién nacido; pero, sorprendentemente, los huesos muestran suturas de fusión que solo se observan en los adultos. Fiorillo y Tykoski plantearon una hipótesis que puede parecer insólita pero que, según mi opinión, resulta muy plausible. Los tiranosaurios del Ártico habrían adquirido un menor tamaño debido a que ese hábitat pobre en recursos no podía albergar especies más voluminosas. Numerosos animales actuales que habitan en islas han desarrollado enanismo por esta misma razón. Así, mientras que *T. rex* gobernaba en el sur, un tiranosaurio de tamaño reducido medraba en el norte.

CUESTIONES PENDIENTES

Las últimas incorporaciones al árbol de los tiranosaurios han esclarecido la historia evolutiva de este grupo carismático. Pero todavía quedan por resolver algunas preguntas clave: ¿de dónde proceden los tiranosaurios? ¿Se originaron antes del Jurásico medio, tal vez durante el Jurásico inferior, una época de la que se conocen pocos fósiles en todo el mundo?

¿Acaso vivieron también en los continentes del sur entre el Jurásico medio y el Cretácico medio? La mayoría de los fósiles se han hallado en los continentes del hemisferio norte, a excepción de un hueso enigmático descubierto en Australia. Pero sabemos que muchos grupos de dinosaurios estaban dispersos por todo el mundo entre el Jurásico medio y el Cretácico medio, por lo que los tiranosaurios quizá también lo estuvieran. Otras incógnitas hacen referencia a su biología. ¿Qué tipo de plumas presentaban los tiranosaurios enormes como *T. rex* y para qué servían? ¿Y de qué forma utilizaban *Qianzhousaurus* y *Alioramus* sus hocicos largos tan peculiares?

Aunque la historia de los tiranosaurios todavía esté incompleta, nos revela una verdad profunda sobre la evolución; a saber, que esta no es predecible. Cuando los tiranosaurios se originaron hace más de 170 millones de años, nadie habría adivinado que estos pequeños depredadores llegarían a dominar continentes enteros. No estaban predestinados para el éxito. Durante 80 millones de años vivieron en las sombras, hasta que los cambios ambientales les dieron la oportunidad de convertirse en el mayor depredador. Y entonces, cuando alcanzaron la cumbre, un asteroide cayó del cielo y desaparecieron. Su fuerza y tamaño no pudieron salvarlos de la devastación mientras los incendios se propagaban con furia, los ecosistemas se colapsaban y los mamíferos iniciaban su marcha hacia el poder.

PARA SABER MÁS

Tyrannosaur paleobiology: New research on ancient exemplar organisms. Stephen L. Brusatte et al. en *Science*, vol. 329, págs. 1481-1485, septiembre de 2010.
A diminutive new tyrannosaur from the top of the world. Anthony R. Fiorillo y Ronald S. Tykoski en *PLOS ONE*, vol. 9, n.º 3, art. e91287, marzo de 2014.
A new clade of Asian late Cretaceous long-snouted tyrannosaurids. Junchang Lü et al. en *Nature Communications*, vol. 5, art. 37898, mayo de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Así vivía *Tyrannosaurus rex*. Gregory M. Erickson en *IyC*, noviembre de 1999.
Tiranosaurios diminutos. Kate Wong en *IyC*, enero de 2012.

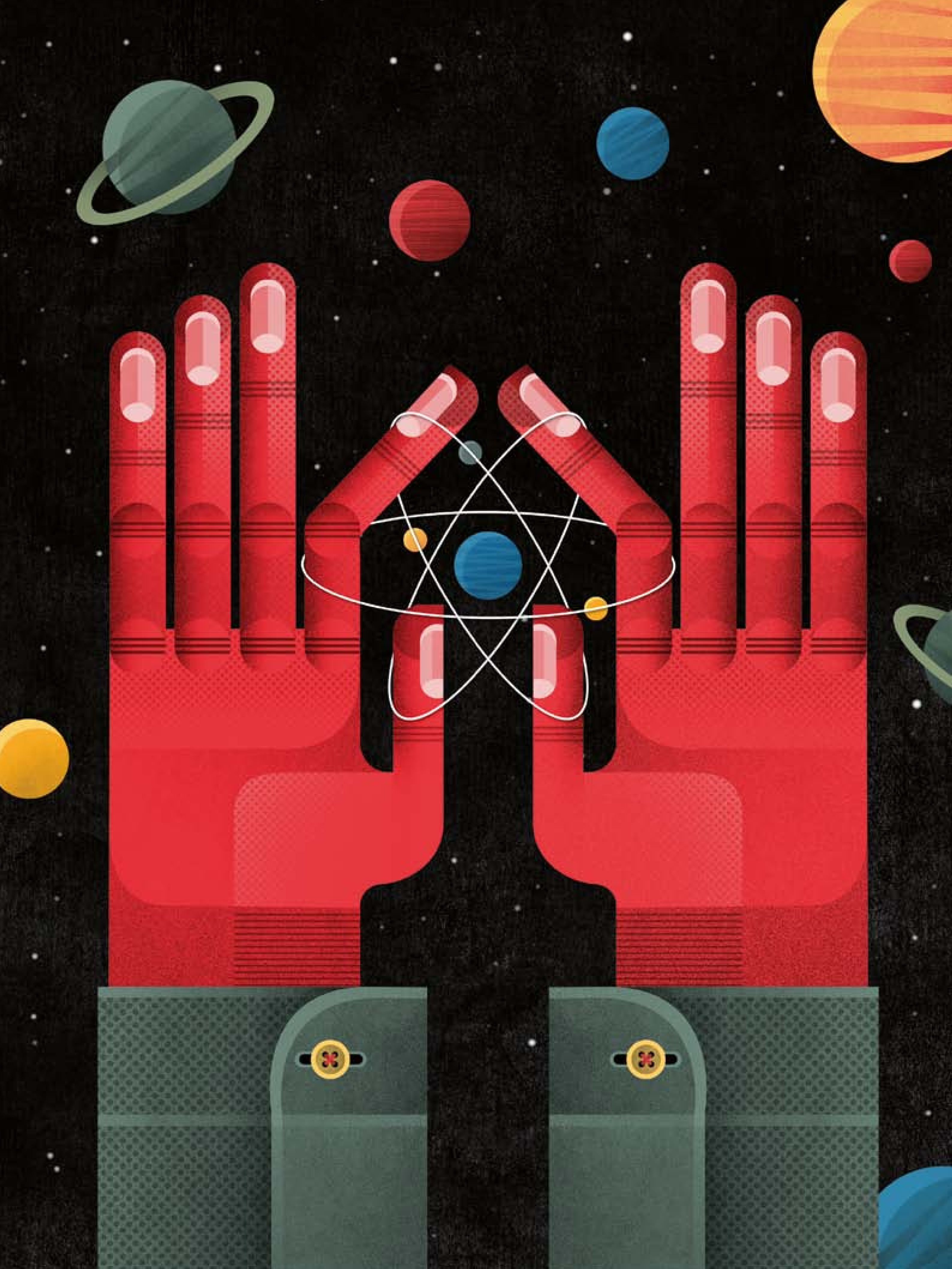
FÍSICA DE PARTÍCULAS

Las enigmáticas propiedades de los gluones

Los físicos saben desde hace décadas que el protón y el neutrón se mantienen cohesionados gracias a los gluones. Sin embargo, los detalles relativos al comportamiento de estas partículas siguen rodeados de misterio

Rolf Ent, Thomas Ullrich y Raju Venugopalan

MARIA CORTE



Rolf Ent trabaja desde 1993 en el Acelerador Nacional Thomas Jefferson, en Virginia, donde es director asociado de física nuclear experimental. Ha ejercido como portavoz de varios experimentos dedicados a estudiar la estructura interna de los hadrones y los núcleos atómicos.

Thomas Ullrich se incorporó al Laboratorio Nacional Brookhaven en 2001; también desempeña actividades docentes y de investigación en la Universidad Yale. Ha participado en varios experimentos, primero en el CERN y luego en Brookhaven, dedicados a crear y estudiar el plasma de quarks y gluones.

Raju Venugopalan dirige el grupo de teoría nuclear del Laboratorio Nacional Brookhaven. Sus investigaciones se centran en la interacción entre quarks y gluones a altas energías.

Los antiguos griegos creían que los átomos eran los constituyentes indivisibles de la materia. Sin embargo, en el siglo xx se consiguió escindir el átomo y se observó que estaba formado por elementos menores: protones, neutrones y electrones. Los dos primeros constan, a su vez, de otros componentes aún más pequeños, los quarks, los cuales se mantienen unidos gracias a ciertas partículas llamadas gluones (del inglés *glue*, «pegamento»). Hoy sabemos que quarks y gluones son partículas verdaderamente elementales. Sin embargo, incluso esta imagen tan detallada de la estructura íntima de la materia es incompleta.

Los experimentos que permiten sondear la estructura de los protones y los neutrones revelan una auténtica orquesta sinfónica en su interior. Cada una de estas partículas alberga en su seno tres quarks, una cantidad variable de gluones y una multitud de pares quark-antiquark que se crean y destruyen constantemente. Pero los protones y los neutrones no son las únicas partículas compuestas por quarks. En el último medio siglo, los experimentos con aceleradores de partículas han puesto de manifiesto que existen muchas otras. En general, las partículas formadas por quarks reciben el nombre colectivo de hadrones.

En la actualidad entendemos bastante bien la manera en que un quark y un gluon interaccionan entre sí. Pero, para nuestra consternación, aún no sabemos cómo esas interacciones dan lugar a las propiedades observadas de los hadrones. Por ejemplo, al sumar las masas de los quarks y los gluones que forman el protón, se obtiene un resultado que queda muy lejos de la masa total de esta partícula. ¿De dónde procede la masa que falta? Tampoco conocemos con exactitud el mecanismo por el que los gluones mantienen ligados a los quarks, ni por qué dicha unión parece depender de un tipo especial de carga, denominada «carga de color». También ignoramos cómo emerge el espín del protón a partir de los espines de los quarks constituyentes.

Si encontrásemos la respuesta a tales preguntas, empezaríamos por fin a entender el funcionamiento de la materia en su nivel más fundamental. Identificar los principales enigmas que rodean a quarks y gluones constituye, en sí mismo, un paso fundamental para entender las propiedades más íntimas de la materia. Las investigaciones presentes y futuras, entre las que se cuenta el estudio de configuraciones exóticas de quarks y gluones, deberían ayudarnos a resolver estos rompecabezas. Con algo de suerte, tal vez pronto salgamos de las tinieblas.

¿De dónde procede la masa del protón?

El misterio de la masa del protón constituye una de las cuestiones más problemáticas. Al mismo tiempo, nos da una buena idea de lo desconcertantes que pueden resultar las interacciones entere quarks y gluones.

Hoy comprendemos bastante bien el mecanismo por el que los quarks y los leptones (la clase de partículas a la que pertenece el electrón) adquieren sus respectivas masas. Estas se deben al campo de Higgs, asociado a la célebre partícula descubierta en 2012 en el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN. El campo de Higgs impregna todo el espacio. Al atravesarlo, quarks y leptones interaccionan con él, y es dicha interacción lo que les confiere su masa. A menudo se cita el mecanismo de Higgs como responsable de la masa visible del universo. Sin embargo, esta afirmación es incorrecta. La masa de los quarks solo da cuenta del 2 por ciento de la masa del protón y del neutrón. El 98 por ciento restante se cree debida a los gluones. No obstante, el modo en que estos contribuyen a la masa del total del nucleón no resulta evidente, ya que los gluones mismos carecen de masa.

Uno de los elementos necesarios para resolver este rompecabezas es la célebre ecuación de Einstein que relaciona la masa de una partícula con su energía. Si la escribimos como $m = E/c^2$, obtenemos una expresión para la masa del protón (m) en función de su energía (E) expresada en unidades de la velocidad de la luz (c). Los gluones dan lugar a la mayor parte de la energía del protón, por lo que, en teoría, para calcular su

EN SÍNTESIS

Los protones y los neutrones se encuentran formados por quarks, los cuales se mantienen unidos gracias a los gluones. A pesar de los avances logrados en las últimas décadas, estas partículas aún plantean varias preguntas.

Los físicos no entienden bien cómo contribuyen los quarks y los gluones a la masa y el espín totales del protón o el neutrón. Tampoco saben por qué los primeros tienen «carga de color», mientras que los segundos son «incoloros».

A fin de entender mejor las interacciones fuertes, varios experimentos intentarán crear estados exóticos de quarks y gluones y cartografiarán con un detalle sin precedentes la estructura interna del protón y el neutrón.

masa bastaría con determinar la energía asociada a los gluones.

Sin embargo, esto último reviste todo tipo de dificultades, ya que a la energía de un gluon contribuyen numerosos factores. La energía de una partícula libre —es decir, una que no interacciona con ninguna otra— viene dada por su movimiento. Pero los quarks y los gluones rara vez se encuentran aislados. Solo sobreviven como partículas libres durante escalas de tiempo increíblemente pequeñas (menos de $3 \cdot 10^{-24}$ segundos) antes de unirse a otras partículas subatómicas y quedar, literalmente, ocultos a nuestra vista. Así pues, la energía total de los gluones no se debe únicamente a su movimiento, sino también a la que emplean en mantenerse unidos entre sí y a los quarks. Para resolver el misterio de la masa del protón necesitaríamos entender cómo «pegan» los gluones. Sin embargo, también esta pregunta se encuentra plagada de dificultades.

¿CÓMO «PEGAN» LOS GLUONES?

Desde cierto punto de vista, la respuesta es sencilla: transmitiendo la interacción fuerte. Sin embargo, esta fuerza se comporta de una manera un tanto extraña.

La interacción fuerte es, junto con la gravitatoria, la electromagnética y la débil (la responsable de las desintegraciones radiactivas), una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. Su nombre se debe a que presenta una intensidad mucho mayor que la de las otras tres. Además de ligar a los quarks en los hadrones, la interacción fuerte mantiene unidos los protones y neutrones del núcleo atómico, para lo que debe contrarrestar la enorme repulsión electromagnética que experimentan los protones entre sí. Cada interacción de la naturaleza está asociada a un tipo de partícula, la «portadora» de la fuerza en cuestión. Y del mismo modo que el fotón, el cuanto fundamental de la luz, transmite la fuerza electromagnética, el gluon hace lo propio con la interacción fuerte.

Pero los gluones exhiben una curiosa propiedad. Según las reglas de la mecánica cuántica, el alcance de una interacción disminuye con la masa de sus portadores. La fuerza electromagnética se propaga hasta el infinito: en principio, un electrón libre en la Tierra y otro en la cara oculta de la Luna experimentarán una ligera repulsión mutua. Ello se debe a que los fotones carecen de masa. En cambio, la interacción fuerte no actúa más allá del núcleo atómico. Esto parecería implicar que los gluones tendrían que poseer una gran masa. Sin embargo, todo indica que carecen de ella.

La interacción fuerte muestra otra peculiaridad: la atracción entre dos quarks aumenta con la distancia. Este comportamiento contrasta con el del electromagnetismo. La fuerza entre dos imanes, por ejemplo, es mayor cuanto más cerca se encuentran y menor cuanto más separados están. Los quarks fueron observados por primera vez en los años sesenta en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), en experimentos en los que se lanzaban electrones muy energéticos contra protones. A veces los electrones los atravesaban, pero otras rebotaban. La velocidad y dirección con que lo hacían indicó la presencia y distribución de los quarks en el interior del protón. Aquellos experimentos, llamados de «dispersión inelástica profunda» (*deep inelastic scatttering*, o DIS), mostraron que, a cortas distancias, los quarks se atraían muy débilmente. No obstante, cuando su separación aumentaba, ya no se comportaban como partículas libres, sino que se atraían con intensidad.

COMPONENTES BÁSICOS DE LA NATURALEZA

Partículas fundamentales

Los núcleos atómicos se componen de dos tipos de partículas elementales: quarks y gluones. Estos últimos son bosones (*derecha*), que, con excepción del higgs, transmiten las interacciones fundamentales de la naturaleza. Los gluones propagan la más intensa de todas, la interacción fuerte, la cual mantiene unidos a quarks y gluones en el interior del protón y el neutrón. Los quarks pertenecen a la categoría de los fermiones, el otro gran grupo de partículas elementales (*izquierda*). Este comprende también los leptones, la clase de partículas a la que pertenece el electrón. Hay seis tipos de quarks agrupados en tres generaciones, pero solo dos de ellos, llamados *arriba* y *abajo*, componen el protón y el neutrón.

Espín — Carga eléctrica — Nombre de la partícula — Masa (en megaelectronvoltios)

FERMIONES

	Generación I	Generación II	Generación III
Quarks	*Arriba* (espín 1/2, carga +2/3, masa 2,3)	*Encanto* (espín 1/2, carga +2/3, masa 1275)	*Cima* (espín 1/2, carga +2/3, masa ~173.500)
Quarks	*Abajo* (espín 1/2, carga −1/3, masa 4,8)	*Extraño* (espín 1/2, carga −1/3, masa 95)	*Fondo* (espín 1/2, carga −1/3, masa 4180)
Leptones	Neutrino electrónico (espín 1/2, carga 0, masa < 0,000002)	Neutrino muónico (espín 1/2, carga 0, masa < 0,19)	Neutrino tauónico (espín 1/2, carga 0, masa < 18,2)
Leptones	Electrón (espín 1/2, carga −1, masa 0,511)	Muon (espín 1/2, carga −1, masa 105,7)	Tauón (espín 1/2, carga −1, masa 1776,8)

Masa creciente →

BOSONES

Partícula	Espín	Carga eléctrica	Masa
Fotón (electomagnetismo)	1	0	0
Gluon (fuerza fuerte)	1	0	0
Z (fuerza débil)	1	0	91.188
W (fuerza débil)	1	±1	80.385
Higgs	0	0	~125.000

MOONRUNNER DESIGN

Cóctel de quarks y gluones

Tanto el protón como el neutrón contienen tres quarks primarios, los cuales se mantienen unidos gracias a los gluones. Sin embargo, el interior de un nucleón incluye también una «espuma cuántica» formada por quarks, antiquarks y gluones que aparecen y se desvanecen constantemente (*esta página*). Ese ambiente tan nutrido dificulta enormemente la respuesta a algunas preguntas fundamentales, como las relativas al origen de la masa y espín del protón, o a la manera en que los gluones consiguen mantener unidos a los quarks en partículas estables. Una línea de ataque consiste en considerar las propiedades teóricas de algunas configuraciones exóticas de gluones y quarks y tratar de crearlas en el laboratorio (*página opuesta*).

Estructura atómica: Dos puntos de vista

En la representación tradicional de un átomo, los electrones orbitan alrededor de un núcleo formado por protones y neutrones, cada uno de los cuales consta a su vez de tres quarks (*abajo*). Sin embargo, al considerar la estructura nuclear con más detalle, aparece un turbio entorno cuántico (*derecha*).

Gluon

Espuma cuántica

Quark

Núcleo

Protón

Quarks

u u d

d u u

d d u

Electrón

Neutrón

El interior de un protón o un neutrón es dinámico. Aparte de los tres quarks básicos, contiene un mar de quarks, antiquarks y gluones que constantemente se crean y se destruyen.

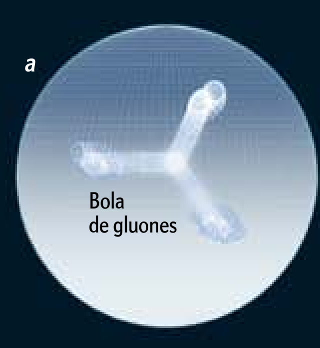
El espín total del nucleón (*flecha*) no depende solo de los espines individuales de sus constituyentes, sino también de su movimiento orbital.

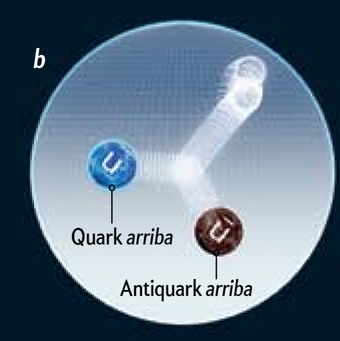
Estados exóticos de la materia

Los físicos han postulado la existencia de varias combinaciones inusuales de quarks y gluones; en algunos casos, han llegado a sintetizarlas en el laboratorio. Dichos estados exóticos brindan nuevas posibilidades para estudiar las interacciones fuertes. Se espera que su análisis contribuya a resolver algunos de los enigmas fundamentales sobre la estructura íntima de la materia.

Bolas de gluones y otras combinaciones

Las simulaciones teóricas sugieren que quarks y gluones pueden combinarse para crear partículas distintas de los hadrones usuales. Entre ellas destacan las «bolas de gluones», formadas exclusivamente por estos portadores (*a*); los estados ligados híbridos quark-antiquark-gluon (*b*); y los tetraquarks, compuestos por dos quarks y dos antiquarks (*c*). Hay cada vez más pruebas de que los tetraquarks ya se han obtenido en el laboratorio. Las bolas de gluones y los estados híbridos aún no han sido detectados.

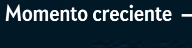




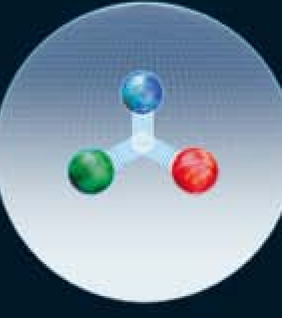


Saturación glúonica

Cuando los protones y neutrones se aceleran a velocidades extremas, los gluones de su interior se multiplican. La energía de los protones aumenta y los gluones se dividen en pares, cada uno con una energía ligeramente inferior a la de la partícula progenitora. A su vez, los nuevos gluones dan lugar a otros de energía aún menor. Llega un momento en el que el protón alcanza un estado de «máxima ocupación» y ya no acepta más gluones. Dicho estado recibe el nombre de «condensado de vidrio de color». Pese a que aún no hay pruebas firmes de su existencia, los aceleradores han obtenido algunos indicios esperanzadores en este sentido.











Imitación del universo naciente

En el cosmos primitivo la temperatura era demasiado elevada para que existiesen átomos, protones o neutrones estables. Los quarks y los gluones se encontraban en un estado llamado «plasma de quarks y gluones» en el que podían moverse con libertad. Los aceleradores de partículas han logrado reproducir dicho estado al hacer colisionar núcleos atómicos pesados a velocidades próximas a la de la luz. Estudiar el enfriamiento de este plasma permitirá abordar varias preguntas relacionadas con la interacción fuerte y la evolución temprana del universo.



ILUSTRACIÓN DE MOONRUNNER DESIGN

Para visualizar el funcionamiento de la interacción fuerte podemos imaginar dos quarks unidos por una cuerda, o goma elástica. Cuando se encuentran muy próximos, la cuerda se destensa y los quarks casi no experimentan ninguna fuerza. Pero, si se alejan el uno del otro, la tensión de la cuerda aumentará y los mantendrá unidos. A una distancia similar al diámetro del protón, la fuerza entre dos quarks equivale a un peso de 16 toneladas. Pero ¿qué ocurre si una fuerza externa tira y se opone a la atracción entre quarks? En tal caso, la cuerda puede romperse. Cómo lo hace exactamente constituye otro misterio de la interacción fuerte, pero su resolución desempeña un papel clave para comprender por qué los gluones actúan en el interior del núcleo atómico pero no fuera de él.

¿POR QUÉ HAY PARTÍCULAS CON COLOR?

La teoría matemática que describe la interacción fuerte, la cromodinámica cuántica (QCD), fue formulada en los años setenta. Del mismo modo que la fuerza electromagnética se encuentra relacionada con la carga eléctrica, la QCD nos dice que la interacción fuerte gira en torno a cierta propiedad denominada «carga de color». El concepto de color ayuda a entender por qué la interacción fuerte resulta tan distinta de la electromagnética, pero, a su vez, plantea nuevas preguntas. Entre ellas, por qué algunas partículas poseen carga de color y otras no. Además, estas últimas no pueden percibir el color de las que sí lo tienen, por lo que podemos decir que son «daltónicas».

Según la QCD, tanto los quarks como los gluones poseen carga de color. Todas las partículas con color intercambian gluones, lo que implica que no solo los quarks lo hacen, sino que también los gluones intercambian gluones entre sí. Esto supone una enorme diferencia con respecto al electromagnetismo: como puede comprobarse fácilmente al cruzar dos rayos de luz en una habitación polvorienta, los fotones no interaccionan unos con otros. Las interacciones entre gluones desempeñan un papel clave a la hora de explicar por qué la interacción fuerte disminuye a distancias cortas. Un gluon puede convertirse de forma temporal en un par quark-antiquark o en un par de gluones para, después, volver a transformarse en un solo gluon. Las fluctuaciones del tipo quark-antiquark incrementan la interacción entre cargas de color, mientras que las asociadas a la producción de pares de gluones la debilita. Estas últimas son más numerosas que las anteriores, por lo que acaban dominando. En 2004, David J. Gross, Frank Wilczek y H. David Politzer recibieron el premio Nobel por este descubrimiento.

En las décadas transcurridas desde la aparición de la QCD, experimentos en todo el mundo han corroborado sus predicciones hasta convertirla en uno de los pilares del modelo estándar de física de partículas. Sin embargo, numerosos detalles de la teoría se nos siguen resistiendo. Por ejemplo, cada uno de los tres quarks que componen un protón tiene uno de tres colores posibles («rojo», «verde» y «azul», pongamos por caso). Sin embargo, el protón carece de carga neta de color. Del mismo modo, un mesón pi, o pion, se compone de un quark y un antiquark, cada uno dotado de carga de color, pero el pion carece de ella. La carga de color neutra de los hadrones resulta análoga a la carga eléctrica neutra de los átomos. Pero, mientras que la carga neta nula de un átomo se debe a una cancelación directa de distintas cargas positivas y negativas, la manera en que los quarks y los gluones se combinan para formar partículas sin color no queda clara en QCD.

La QCD también debería explicar cómo los protones y los neutrones permanecen unidos en el núcleo atómico a pesar de la intensa repulsión electromagnética que experimentan los protones. Aunque se han dado algunos pasos, deducir la física nuclear a partir de las ecuaciones de la teoría continúa planteando todo tipo de desafíos. El escollo principal se debe a que los cálculos se tornan terriblemente complejos al aplicarlos a la escala de distancias en que la interacción entre quarks y gluones se hace muy intensa. Por último, seguimos sin disponer de una demostración matemática rigurosa que, a partir de las ecuaciones básicas de la teoría, garantice que quarks y gluones permanecerán siempre confinados en el interior de hadrones sin color. Este es, literalmente, un problema de un millón de dólares: se trata de uno de los Problemas del Milenio seleccionados por el Instituto Clay de Matemáticas, que ha ofrecido dicha cifra a quien consiga resolver cualquiera de ellos.

¿POR QUÉ LOS GLUONES NO SE MULTIPLICAN PARA SIEMPRE?

Una de las conclusiones más sorprendentes de la QCD es que el número de gluones y quarks en el interior de un protón puede cambiar de manera considerable. Además de los tres quarks básicos, una cantidad variable de gluones y de pares quark-antiquark aparecen y desaparecen sin cesar. El resultado es una «espuma cuántica» de partículas que constantemente se crean y se destruyen.

Se cree que, cuando los protones y los neutrones alcanzan velocidades extremas, los gluones de su interior empiezan a dividirse y a formar pares de gluones con una energía ligeramente inferior a la del progenitor. A su vez, dichos gluones producen otros. El proceso debería parecerse a una máquina de palomitas de maíz fuera de control. La teoría sugiere que podría durar indefinidamente. Y, sin embargo, no ocurre así. Si los gluones continuasen reproduciéndose, la tapa de la máquina saltaría por los aires. En otras palabras, el protón se volvería inestable. Pero sabemos que la materia es estable, por lo que debe haber algo que detenga la generación en cascada de gluones. ¿De qué se trata?

Una idea es que la naturaleza coloca un cartel de «aforo completo» cuando los gluones se tornan tan numerosos que comienzan a superponerse dentro del protón. Sus interacciones mutuas hacen que se repelan, y los menos energéticos vuelven a combinarse para formar gluones de mayor energía. De esta manera, el aumento en el número de gluones se ralentizaría hasta alcanzar un estado estacionario, conocido como saturación gluónica, en el que la división y la recombinación se equilibran.

Ese hipotético estado de saturación gluónica, a menudo llamado «condensado de vidrio de color», puede considerarse la esencia destilada de algunas de las fuerzas más intensas del universo. De momento solo contamos con atisbos de su existencia y no entendemos por completo sus propiedades. Pero, gracias a los potentes experimentos de DIS de los que disponemos hoy, deberíamos ser capaces de examinar los gluones en su forma más densa y extrema. ¿Es el campo de fuerza que mantiene unido a los protones el mismo que limita la cantidad de gluones en un condensado de vidrio de color? En tal caso, observar dicho campo en diferentes contextos podría ayudarnos a entender cómo es generado por los gluones.

¿DE DÓNDE PROCEDE EL ESPÍN DEL PROTÓN?

Otro misterio que rodea a quarks y gluones es cómo se combinan sus espines para dar lugar al espín de la partícula compuesta. Todos los hadrones tienen espín, análogo a la rotación de una

peonza que gira en torno a su eje. Hadrones con distinto espín siguen diferentes movimientos de precesión y giro cuando se ven expuestos a campos magnéticos muy intensos.

Los experimentos que sondean la estructura interna del protón muestran que los quarks contribuyen en un 30 por ciento al espín total. ¿De dónde procede el resto? La imagen de los hadrones como un mar bullicioso de quarks y gluones sugiere que estos últimos deberían aportar el espín que falta. Sin embargo, las colisiones entre protones polarizados (aquellos cuyos espines apuntan, bien en el sentido del movimiento, bien en el opuesto) indican que los gluones solo dan cuenta de un 20 por ciento del espín total. Seguimos sin poder explicar el 50 por ciento restante.

Una analogía celeste nos servirá para ilustrar una posible solución. El momento angular del sistema solar se obtiene al sumar el asociado a la rotación de los planetas y, además, el debido a su movimiento orbital alrededor del Sol. Los quarks, antiquarks y gluones confinados en el protón siguen, asimismo, sus propias órbitas. Para entender la importancia de dicho movimiento, deberíamos cartografiar las velocidades y posiciones de los quarks y gluones que componen el protón. Con ese fin, uno de nosotros (Ent) participa en experimentos de DIS con rayos de electrones de alta intensidad. Si hasta ahora podíamos «fotografiar» el protón, dichos experimentos equivalen a filmar un vídeo en 3D de la materia a escalas subfemtométricas (de menos de una milbillonésima de metro).

ESTADOS EXÓTICOS DE LA MATERIA

Para entender la verdadera naturaleza de las interacciones entre quarks y gluones, habremos de estudiar no solo cómo se agrupan estos en las partículas habituales, como el protón y el neutrón, sino en todas sus posibles combinaciones. La QCD predice la formación de otros estados hadrónicos sin carga neta de color. Las simulaciones sugieren la existencia «bolas de gluones» (estados ligados formados exclusivamente por estas partículas), tetraquarks («moléculas» compuestas por dos pares quark-antiquark) y otras entidades híbridas, clasificadas como estados ligados quark-antiquark-gluon. Los datos experimentales sobre esta clase de partículas son por ahora muy limitados, con unos pocos candidatos a tetraquark identificados hasta la fecha. Pero esa situación podría mejorar pronto gracias a varios experimentos en todo el mundo. Entre ellos, la instalación llamada GlueX, que empezará a operar pronto en el Acelerador Nacional Thomas Jefferson, en Virginia.

Hace poco, al hacer colisionar núcleos atómicos a velocidades muy próximas a la de la luz, se consiguió recrear un estado extremo de la materia conocido como «plasma de quarks y gluones». Hay razones teóricas para pensar que, cuando los protones y los neutrones de los núcleos chocan, sus condensados de vidrio de color se rompen, el confinamiento de quarks y gluones se deshace y la energía liberada crea un enjambre febril de quarks y gluones. Dicho plasma constituye la sustancia más caliente jamás creada en la Tierra, con una temperatura que supera los cuatro billones de grados Celsius. Pero, sorprendentemente, ese estado de la materia fluye sin oponer casi resistencia: esta es, al menos, veinte veces menor que la del agua.

El plasma de quarks y gluones guarda un gran parecido con las condiciones que reinaron en el universo primitivo. Los experimentos que han conseguido producirlo (el Colisionador de Iones Pesados Relativistas (RHIC) del Laboratorio Nacional de Brookhaven, en EE.UU., y el LHC del CERN) nos han brindado la oportunidad de analizar los fluidos más pequeños y perfectos jamás creados. Al estudiar su proceso de enfriamiento, dos de nosotros (Ullrich y Venugopalan) y otros investigadores estamos intentando entender mejor la evolución del universo. Y al examinar la disociación de los protones y los neutrones que dan lugar a este plasma, podemos analizar el proceso de confinamiento en sentido inverso, lo que a la postre podría ayudarnos a comprender por qué los quarks y gluones permanecen siempre ligados.

SENDAS FUTURAS

Lo ideal sería conocer con exactitud la distribución, el movimiento y el espín de los quarks y los gluones que conforman un protón o un neutrón. Ello nos permitiría calcular con todo detalle la manera en que dichas partículas fundamentales contribuyen a la masa y el espín del nucleón; un avance sin precedentes en la carrera por entender las interacciones fuertes. Para ello necesitamos un femtoscopio de quarks y gluones, una herramienta de DIS análoga a un microscopio para explorar el universo a escalas mil veces menores que el radio del protón. En EE.UU., el Laboratorio Jefferson y el de Brookhaven están intentando obtener la aprobación y financiación necesarias para construir un femtoscopio que haga colisionar electrones contra protones polarizados y núcleos de plomo. En comparación con los experimentos previos, que lanzaban electrones a gran velocidad contra un blanco nuclear en reposo, aquí ambos tipos de partículas se acelerarían hasta alcanzar velocidades muy próximas a la de la luz antes de chocar.

El Colisionador de Electrones e Iones (EIC) alcanzaría una intensidad sin parangón; es decir, el número de partículas en los haces y su densidad serían tan elevadas que los choques se producirían con una frecuencia enorme. Este aumento en la tasa de colisiones, que sería hasta mil veces mayor que la lograda en los experimentos de DIS realizados hasta ahora, permitiría obtener un gran número de instantáneas sobre la estructura interna del protón y el neutrón.

Durante las cuatro décadas que han transcurrido desde la formulación de la cromodinámica cuántica, se han dado pasos de gigante para explicar la interacción fuerte y para identificar las lagunas que aún persisten. Las técnicas que estamos desarrollando hoy nos dan la esperanza de que, para dentro de otros cuarenta años, habremos desentrañado la estructura de la materia a su nivel más fundamental.

PARA SABER MÁS

Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. David J. Gross y Frank Wilczek en *Physical Review Letters*, vol. 30, n.º 26, págs. 1343-1346, 25 de junio de 1973.

Reliable perturbative results for strong interactions? H. David Politzer en *Physical Review Letters*, vol. 30, n.º 26, págs. 1346-1349, 25 de junio de 1973.

EN NUESTRO ARCHIVO

El confinamiento de los quarks. Yoichiro Nambu en *IyC*, enero de 1977, y en «Grandes ideas de la física», colección *Temas de Investigación y Ciencia*, junio de 2015.

Teorías gauge de las fuerzas entre partículas elementales. Gerard 't Hooft en *IyC*, agosto de 1980, y en «Grandes ideas de la física», colección *Temas de Investigación y Ciencia*, junio de 2015.

Los primeros microsegundos. Michael Riordan y William A. Zajc en *IyC*, julio de 2006.

Cuarenta años de libertad asintótica. Antonio González-Arroyo en *IyC*, junio de 2013.



MADRE E HIJA: Carolina, de 17 años, abandonó el instituto para atender a su madre, Yolanda, de 53, que desde hace años está afectada por una rara forma hereditaria de alzhéimer.



MEDICINA

CONJURAR LA MALDICIÓN DEL ALZHÉIMER

Un grupo de familias colombianas afectadas por una rara forma hereditaria de la enfermedad ha atraído la atención de los científicos que buscan tratamientos contra este mal

Gary Stix

Fotografías de Juan Arredondo

Gary Stix es redactor de *Scientific American*.





En 2007, Alejandra albergaba las ilusiones de cualquier chica de dieciséis años. Asistía a la escuela secundaria en Medellín, una de las grandes ciudades de Colombia. Tras las horas de estudio, dedicaba tantas como podía a pasar el rato con sus amigos por los rincones favoritos de la ciudad.

Un buen día, su madre comenzó a perder la memoria. Mujer taciturna pero educada, saludaba a un visitante para, instantes después, repetir el gesto, una y otra vez. El alzhéimer precoz de Yolanda truncó la adolescencia de su hija Alejandra. Quisiese o no, esta tuvo que asumir la responsabilidad de cuidar a su madre, cada vez más desvalida.

Alejandra, que ahora tiene 24 años, se ha mudado a un piso del cercano municipio de Copacabana que comparte con su tía y dos tíos, su hija de nueve años, Luna, y su hermana de 17, Carolina, que también abandonó el instituto para ayudarla. Su madre ya no camina ni habla y pasa casi todo el tiempo reclinada en una silla. Uno de sus tíos, de 51 años, también padece demencia.

Cada día las jóvenes cocinan y alimentan a través de una sonda a su madre y a su tío Albeiro. Después los asean y los acuestan. Día tras otro se repite la misma rutina, sin que haya descanso para celebrar un aniversario o tomar unas breves vacaciones. Alejandra asegura que no ha perdido la esperanza y que tiene planes: le gustaría estudiar enfermería. Pero son tantos los sueños que no ha podido cumplir... Se siente como si estuviera envejeciendo prematuramente.

La joven presintió su destino mucho antes de que le diagnosticaran la enfermedad a su madre. De niña recuerda cómo esta cuidaba de su abuela, aquejada por el mismo mal. En este rincón del mundo muchas otras personas comparten el destino de Alejandra. Ella y su familia forman parte de los más de 5000 miembros de 26 clanes familiares, esparcidos por toda la provincia de Antioquia, que presentan un alto riesgo de contraer una rara forma hereditaria de alzhéimer. La mutación que la provoca se ha denominado Paisa, un apodo regional que reciben los antioqueños. Localizada en el cromosoma 14, su origen se remonta a la época de la conquista española, en el siglo XVI. Todo aquel que hereda una copia del gen alterado de la madre o del padre contrae irremisiblemente la dolencia a temprana edad.

El alzhéimer familiar, como se ha denominado a esta variante, supone apenas el 1 por ciento de los más de 35 millones

EN SÍNTESIS

Un neurólogo colombiano ha descubierto 26 grandes familias con una rara forma hereditaria de alzhéimer, la mayoría residentes en zonas rurales cercanas a la ciudad de Medellín.

El tamaño del grupo, formado por más de un millar de portadores de una mutación que casi seguro los condena a sufrir la enfermedad, hace de ellos sujetos ideales para un innovador ensayo clínico, la Iniciativa para la Prevención del Alzhéimer.

Los participantes del estudio, que tiene lugar en Medellín, recibirán un fármaco experimental; en ciertos casos, 15 años antes de que aparezcan los primeros síntomas de la demencia.

Si en los ensayos se lograra prevenir el alzhéimer (en lugar de tratarlo después del diagnóstico), cambiaría por completo el desarrollo de fármacos contra este mal.





YUGO DIARIO: Alejandra, de 24 años, dedica casi todo su tiempo a cuidar de su madre, Yolanda, y apenas puede disfrutar de su hija de nueve años, Luna, que posa junto a su abuela con el vestido de la primera comunión (*derecha*).

de casos diagnosticados en todo el mundo. (En fecha reciente, ha adquirido resonancia a raíz del Óscar concedido a Julianne Moore por su interpretación en *Siempre Alice*, donde encarna a una mujer con alzhéimer precoz). Por desgracia, la enfermedad es asaz frecuente entre las familias de los alrededores de Medellín. La mutación Paisa afecta a más del 20 por ciento de los más de 5000 integrantes de las 26 familias. Los portadores tienen muchas posibilidades de manifestar el trastorno antes de los 50 años.

La previsibilidad del alzhéimer en estos habitantes de Antioquia ha comenzado a atraer la atención de especialistas de todo el mundo. Desde hace años, todos los intentos por desarrollar un tratamiento contra el mal han caído en saco roto. Frustrados por la larga serie de reveses, los expertos han llegado a la conclusión de que, una vez que los síntomas aparecen, resulta demasiado tarde para frenar el avance de la enfermedad. Así que han dirigido su mirada hacia la prevención. En lugar de tratar a los pacientes que muestran los primeros signos de demencia, tal vez convenga más administrar los fármacos experimentales a personas todavía sanas y someterlas a un control regular para comprobar si permanecen sin cambios o acaban contrayendo el alzhéimer.

La ejecución de esos estudios en la población general sería larga y costosa por la dificultad de prever el momento, si llega, en que brotará la enfermedad, pero tal incertidumbre se disipa en esta peculiar población colombiana. Por esta razón, se ha iniciado un ensayo clínico, con la participación de familias portadoras de la fatídica mutación, para comprobar si cierto fármaco ayuda a eludir el alzhéimer. Tras haber vivido con la cruda realidad la demencia desde hace siglos, estas familias se han convertido en un eslabón vital para la investigación de los tratamientos preventivos.

LA VISIÓN

El cambio de énfasis hacia la prevención en la lucha contra el alzhéimer hace uso del avance más importante en el estudio de la enfermedad de los últimos años. El ensayo clínico que está en marcha recurre a la resonancia magnética y a la tomografía por emisión de positrones, unas técnicas de diagnóstico por la imagen que, combinadas con la punción lumbar, permiten revelar los signos del alzhéimer en el sistema nervioso central. Gracias a ellas se pueden examinar los cambios que afectan al cerebro de las personas condenadas a sufrir demencia, en ciertos casos décadas antes de recibir el diagnóstico formal de la enfermedad.

Esas nuevas herramientas ayudarán a saber lo que puede suceder con un fármaco, quizás incluso uno que haya fracasado anteriormente, cuando se administra años antes de que el paciente comience a perder la memoria. Si los cambios cerebrales relacionados con el alzhéimer no aparecen en las imágenes diagnósticas —y el paciente no muestra ninguna alteración cognitiva—, tal vez el fármaco esté ayudando a evitar la enfermedad. La previsibilidad del alzhéimer en los antioqueños de mediana edad con la mutación Paisa ha hecho aumentar el interés por incluirlos en ensayos clínicos que investigan estrategias terapéuticas presintomáticas.



¿FÁRMACO O PLACEBO? **Orfa, de 36 años, recibe inyecciones de uno u otro. Regularmente abandona su labor en los cafetales para acudir a la Universidad de Antioquia, donde participa en la Iniciativa para la Prevención del Alzhéimer.**

Un protagonista fundamental de esa búsqueda es Francisco Lopera, neurólogo de 63 años que comenzó a estudiar las familias de Antioquia mucho antes de que nadie fuera consciente de su importancia en la investigación del alzhéimer. Lopera pasó su adolescencia en Yarumal, localidad donde residen muchas familias con la mutación. Recuerda vecinos de su niñez que sufrieron demencia a mediana edad. Tras concluir su trabajo de posdoctorado en Bélgica, a finales de los años ochenta, tuvo claro que podía hacer mucho más como científico en Colombia que desarrollando una carrera profesional en un centro de investigación europeo. Por entonces ya había conocido la primera familia que sospechaba que estaba afectada por una forma hereditaria de la enfermedad. En 1987 regresó a Colombia, ganó la plaza de neurólogo en la Universidad de Antioquia y reanudó el estudio de las familias con alzhéimer precoz.

Lopera es hoy el jefe del grupo de neurociencias de dicha universidad y, a lo largo de estos años, ha podido trazar con precisión los árboles genealógicos de las 26 familias afectadas. En su investigación ha tenido que vencer obstáculos que no hubiera hallado si hubiese permanecido en Europa. A fin de mantener el contacto regular con las familias, en ocasiones se ha visto obligado a recurrir a una escolta militar para atravesar las regiones azotadas por los combates entre el ejército y la guerrilla colombiana. Incluso durante un tiempo, quince años atrás, el peligro era tal que tuvo que renunciar a las visitas.

La curiosidad inicial por esas familias y lo que parecía una forma hereditaria de alzhéimer se convirtió en una empresa de investigación en toda regla. En colaboración con Kenneth S. Kosik, entonces en la Escuela de Medicina de Harvard, Alison Goate, de la Universidad Washington en San Luis, y otros investigadores estadounidenses, Lopera halló en 1995 la ubicación exacta de la mutación Paisa en un gen del cromosoma 14.

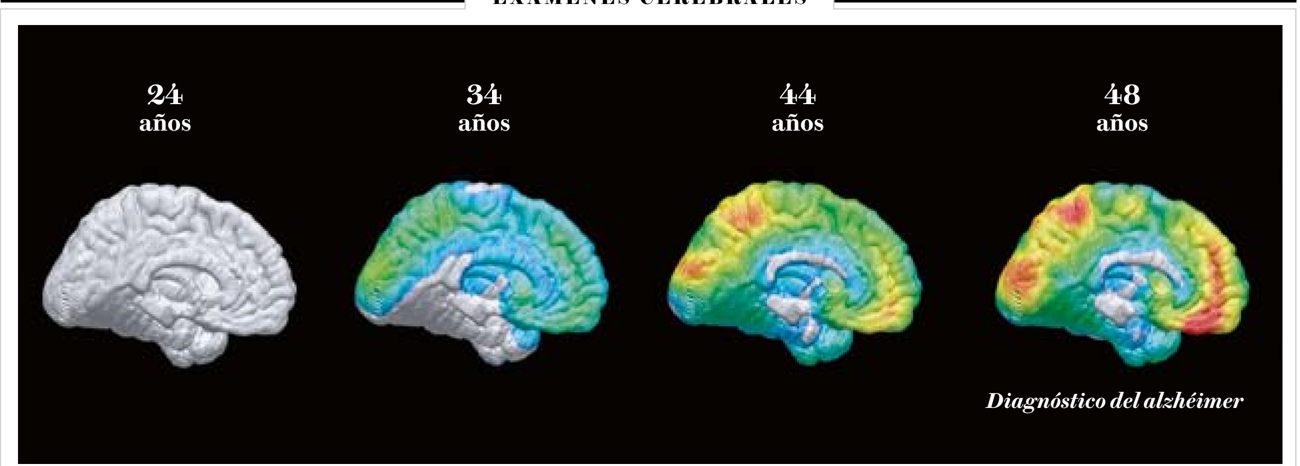
Que los esfuerzos se centren hoy en la prevención es consecuencia del estrepitoso fracaso de los tratamientos ensayados hasta la fecha en los pacientes con alzhéimer. De los 413 estudios clínicos registrados entre 2002 y 2012, más del 99 por ciento no han cosechado los frutos esperados. Los escasos fármacos que han recibido el visto bueno de las autoridades sanitarias aportan a veces un alivio pasajero de los síntomas, pero no consiguen frenar el deterioro de la memoria y de otras capacidades cognitivas.

Esa larga cadena de fracasos ha obligado a las compañías farmacéuticas y a los investigadores universitarios a emprender ensayos clínicos con pacientes sanos. Ahora se piensa que en el momento en que los primeros síntomas del alzhéimer hacen acto de presencia, las neuronas ya han comenzado a morir y los lazos de comunicación entre ellas han dejado de funcionar. Y cuando empiezan a surgir los problemas de memoria, no parece haber remedio que pueda salvar al paciente de la enfermedad.

Los 26 clanes colombianos ofrecen una oportunidad única para el estudio de los tratamientos presintomáticos, porque el millar largo de portadores de la mutación Paisa constituye un grupo lo bastante numeroso para obtener resultados relevantes en los ensayos clínicos. Y como el alzhéimer familiar es tan predecible en ellos, es posible remontarse 10 o 15 años atrás para calcular el momento en que el fármaco comenzó a frenar la enfermedad.

Esas familias han adquirido tanta notoriedad que su existencia llegó a oídos del Instituto Banner para el Alzhéimer en Phoenix, en Arizona, que atrajo la atención de los grandes laboratorios farmacéuticos en 2010 para convencerlos de que apostaran por los ensayos preventivos. El instituto se asoció con Genentech y con la Universidad de Antioquia para emprender un ensayo con crenezumab, un anticuerpo monoclonal con el

EXÁMENES CEREBRALES



Una espera cautelosa

Los estudios clínicos para la prevención del alzhéimer son ahora posibles gracias a la aplicación de técnicas modernas (diagnóstico por la imagen del cerebro, punciones lumbares y test psicológicos de alta sensibilidad), que permiten saber si la enfermedad avanza antes de que la persona comience a perder la memoria. Una modalidad especial de tomografía por emisión de positrones revela la característica acumulación nociva de amiloide beta (*regiones coloreadas, arriba*) que se produce en el cerebro de portadores de la mutación Paisa de varias edades hasta el momento del diagnóstico del alzhéimer. Tales depósitos no se aprecian en el cerebro de los familiares de edad similar que no presentan la mutación (*imágenes no mostradas*). Otra técnica del estudio clínico colombiano, la resonancia magnética (*abajo*), revela si se ha iniciado la atrofia cerebral hasta 10 años antes del diagnóstico.

CORTESÍA DE ERIC M. REIMAN, INSTITUTO BANNER PARA EL ALZHÉIMER (*tomografías*)

que se pretende eliminar del cerebro los fragmentos tóxicos de proteína amiloide beta. El presupuesto del proyecto supera los 100 millones de dólares, aportados por Genentech, la Fundación Banner para el Alzhéimer y los Institutos Nacionales de Salud de EE.UU.



EL ENSAYO

Bautizado como la Iniciativa para la Prevención del Alzhéimer, el ensayo resulta peculiar en varios aspectos. Se lleva a cabo fuera de los seguros confines de un gran centro médico en Boston o San Francisco. Y ni Lopera ni la Universidad de Antioquia cuentan con experiencia en ensayos clínicos de ningún tipo, y mucho menos en la aplicación de los protocolos de estudio (que aún no son definitivos) para determinar si un medicamento frena con eficacia la enfermedad, en ciertos casos hasta 15 años antes de que los síntomas aparezcan. «Nadie creía que este tipo de proyecto tan ambicioso se pudiera realizar en Latinoamérica», reconoce Lopera. Pero, afortunadamente, la Fundación Banner «confió en nosotros y hemos demostrado que podemos trabajar con ellos con rigor. El proyecto ha arrancado bien gracias a esa confianza».

A finales de 2013, el equipo de investigación comenzó a administrar el fármaco a los primeros participantes, la mayoría de ellos en su tercera o cuarta década de vida. Pero la búsqueda de personas que se incorporen al estudio no ha cesado, pues se pretende tratar a un centenar de portadores de la mutación Paisa. (También hay dos grupos de placebo, compuestos por cien portadores y por otras tantas personas que no lo son.) Cada persona deberá someterse a cinco años de pruebas. Los estudios de imágenes cerebrales y las punciones lumbares determinarán si el medicamento consigue frenar la acumulación de amiloide beta. El deterioro cognitivo se evaluará con test psicológicos.

Si se demostrara que el crenezumab altera el curso de la enfermedad, se habría dado un paso decisivo en el tratamiento del alzhéimer. Entonces, se iniciarían los estudios para averiguar si el fármaco también actúa en personas ancianas y sanas que carecen de la mutación pero cuyas imágenes cerebrales revelan que están experimentando los primeros cambios patológicos.

Los lazos que Lopera y sus colaboradores han trabado en el transcurso de todos estos años con las 26 familias afectadas han sido fundamentales para despertar el interés y las ganas por participar en el estudio. Lopera, de larga cabellera canosa y raya en medio, dispensa un trato franco a los familiares. El pasado noviembre supo que algunos periodistas de visita en Medellín querían publicar los apellidos de los pacientes que habían entrevistado, a lo que se opuso rotundamente a pesar de que contaban con su permiso explícito. Lopera advirtió del riesgo de estigmatizar el apellido familiar, incluso el de los miembros no afectados por la mutación. Cabía la posibilidad de que, a partir de entonces, tuvieran dificultades para contratar un seguro o contraer matrimonio.

Las familias colombianas, cuyos recuerdos acerca de parientes enfermos se remontan varias generaciones, han acogido el estudio con entusiasmo. Shehnaaz Suliman, responsable del proyecto en Genentech, cree que los participantes, muchos de los cuales habrán de recorrer largas distancias para llegar al hospital y recibir las inyecciones del tratamiento, demostrarán más compromiso de lo que es habitual en los ensayos de esta índole llevados a cabo en Estados Unidos o Europa.

Esa convicción tal vez se vea reforzada por ejemplos como el de Hugo, un antioqueño de 40 años que el pasado noviembre trabajaba como mozo de cuadras en una hípica del pueblo de El Retiro. Dos veces al mes, Hugo recorre los 30 kilómetros que separan la localidad de Medellín para recibir el tratamiento: crenezumab o placebo. Ni él ni el personal médico conocen el contenido de la inyección.

Aunque al final resulte que ha sido asignado al grupo del placebo, Hugo comprende la importancia del estudio. Su padre y su abuelo murieron de alzhéimer, y cuatro de sus tíos, dos ya difuntos, también lo han padecido. Recuerda cómo su padre enfermo sacaba lustre obsesivamente a los zapatos de la familia durante todo el día y perdía los nervios si dejaba de ver a su mujer siquiera un segundo. «Es duro. Esta es una herencia que viene de lejos y debes aceptarla, te guste o no», afirma.

Los estudios ofrecen una brizna de esperanza a Hugo y sus parientes. «Nos hemos comprometido porque, con la ayuda del doctor Lopera, esperamos que esos tratamientos tengan un resultado positivo y pueda haber cura para nuestros hijos».

A pesar de los sombríos antecedentes médicos de la familia, Hugo y varios de sus parientes con los que se hallaba reunido un día gris de noviembre ofrecen todo un ejemplo de aplomo y fortaleza. Se apoyan unos a otros para no olvidar las pequeñas cosas, lo que puede significar el primer signo de la afección. Le pregunto a la hermana de Hugo, Gudiela, de 47 años, que también participa en el estudio, si le preocupa la demencia. «Sinceramente, no», afirma sin titubeos. «Quien ha de estar preocupado es el que tenga que cuidar de mí.» La respuesta es recibida con una sonora carcajada de los presentes.

Los primeros resultados que permitirán saber si el estudio colombiano sirve de algo para los portadores de la mutación Paisa no verán la luz hasta 2018 (el estudio concluye en 2021). No hay ninguna garantía de que el crenezumab funcione. De hecho, ha fracasado en un ensayo estadounidense de 2014 con pacientes que sufrían alzhéimer de leve a moderado. El análisis



PARTICIPANTES DISPUESTOS: **Hugo, de 40 años (*izquierda*), y Gudiela, de 47 (*arriba*), han acogido de buen grado el estudio de prevención. Aun en el caso de que no les reporte ningún bien, tal vez sea de ayuda para la próxima generación de la familia, algunos de cuyos integrantes rodean a Gudiela.**

minucioso de los datos demostró que podría haber ofrecido cierta ayuda en las etapas iniciales de la enfermedad. Precisamente por esa razón, los investigadores siguen adelante con el estudio colombiano, a fin de averiguar lo que podría suceder si el fármaco se administrase mucho antes de la aparición de los primeros síntomas.

Aunque el crenezumab también fracase en Colombia, no todo estará perdido. El ensayo representa el mejor análisis, hasta la fecha, para demostrar la hipótesis del amiloide beta, vigente desde hace tres décadas. Esta plantea que los fragmentos tóxicos de la proteína son la causa de la patología del alzhéimer. Si el ensayo no comporta ningún beneficio para Hugo, Gudiela y otros miembros de las 26 familias, y si los demás ensayos de prevención emprendidos en EE.UU. acaban igualmente en agua de borrajas, los círculos científicos tendrán que comenzar a indagar otras hipótesis distintas. Tal vez sea preciso ensayar fármacos que neutralicen la acumulación de otras proteínas tóxicas, o experimentar con sustancias que protejan las neuronas o regulen los procesos bioquímicos responsables de la inflamación del cerebro.

Incluso entonces, la infraestructura construida en Medellín para los ensayos clínicos con crenezumab podría servir para el propósito original de examinar nuevas estrategias preventivas. La posibilidad de predecir el inicio de la enfermedad en un paciente afectado por la mutación Paisa seguiría siendo una gran baza para el descubrimiento de nuevos fármacos en el futuro. Medellín empieza a despuntar como centro internacional en la investigación del alzhéimer —y como posible escenario de un avance de suma importancia—, una condición que podría perdurar años.

La ciudad podría mantener ese puesto porque la cohesión social de estas familias, así como la realidad de la demencia que afecta a padres, abuelos y tíos, probablemente asegurarán la afluencia de participantes a los ensayos clínicos. Los miembros de la familia, además, demuestran una inclinación natural para el cuidado de los enfermos, en contraste con la medicina deshumanizada que con tanta frecuencia se practica hoy en EE.UU. y en Europa. Hugo recuerda los breves paseos con su padre, cogido de su mano para que no se perdiera, incapaz de recordar el camino de vuelta a casa.

Esos fuertes lazos familiares garantizan que un jornalero rural, a menudo acompañado por parientes, acudirá sin falta al hospital cada quince días para recibir el medicamento o someterse a una exploración cerebral. La maldición de los conquistadores bien podría convertirse en una bendición si se concreta en un descubrimiento fundamental que resulte beneficioso para los millones de personas que en cualquier punto del globo recibirán el temido diagnóstico.

PARA SABER MÁS

Phoenix: Vision of shared prevention trials lures pharma to table, Parte 1. Gabrielle Strobel en Alzforum. Publicado en línea el 25 de febrero de 2010. **www.alzforum.org/news/conference-coverage/phoenix-vision-shared-prevention-trials-lures-pharma-table.**

Alzheimer's prevention initiative: A plan to accelerate the evaluation of presymptomatic treatments. Eric M. Reiman et al. en *Journal of Alzheimer's Disease*, vol. 26, supl. n.º 3, págs. 321-329, octubre de 2011.

Origin of the PSEN1 E280A mutation causing early-onset Alzheimer's disease. Matthew A. Lalli et al. en *Alzheimer's & Dementia*, vol. 10, n.º 5, supl., págs. S277-S283, octubre de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Desactivar la enfermedad de Alzheimer. Michael S. Wolfe en *IyC*, julio de 2006.

Anticiparse al alzhéimer. Gary Stix en *IyC*, agosto de 2010.

VINICULTURA

¿Cómo afecta el cambio climático a los vinos?

El calentamiento del planeta está alterando la composición de las uvas. Para que ello no afecte al sabor del vino, se están ensayando varias estrategias

Kimberly A. Nicholas



Era un día caluroso y me hallaba en el viñedo cubierta de polvo, de sudor y del zumo pegajoso de las uvas que había estado recogiendo para investigar cómo influyen la insolación y la temperatura en las características bioquímicas de la uva. De pronto, vi algo que hizo que me detuviera en seco. En un rincón de la parcela de 2,6 hectáreas en Carneros, en el legendario valle californiano de Sonoma, con sus ordenadas hileras de uvas pinot noir, descubrí un grupo de extrañas vides. Durante mi formación de grado en viticultura había estudiado la antigua técnica de la ampelografía, la práctica de identificar vides por la forma de sus hojas y racimos, lo que me ayudó a reconocerlas: variedades tintas de cabernet franc, petit verdot, syrah y malbec, y una variedad blanca, sauvignon blanc.

Cuando coincidí de nuevo con Ned Hill, un viejo amigo de la escuela que ahora gestiona algunos de los mejores viñedos de la región, incluido este, le pregunté por aquellas extrañas vides. «Son un experimento que estoy haciendo», explicó. «Comienza a hacer demasiado calor por aquí para el pinot. Ahora mismo su precio es bueno y no quiero cambiarlo. Pero puede que muy pronto convenga cultivar otras variedades y estoy realizando pruebas con algunas adaptadas a climas más cálidos.»

EN SÍNTESIS

Con el cambio climático, las temperaturas están ascendiendo en numerosas zonas vinícolas. Puesto que el calor provoca la acumulación de ciertos compuestos en las uvas, si el ascenso continúa, el vino de una región dada podría cambiar de sabor.

Las temperaturas más cálidas dan lugar a un mayor contenido de azúcar en las uvas, lo que se traduce en la formación de más alcohol durante la fermentación. También modifican los compuestos minoritarios responsables de los aromas, que resultan esenciales en nuestra percepción del sabor.

Los viticultores están tomando medidas para intentar adaptarse al cambio climático, como reorientar las hileras de las vides o reordenar las hojas para obtener más sombra. Trasladar un viñedo a zonas más frescas resulta caro y no siempre da como resultado un vino con el mismo sabor, debido a las nuevas condiciones de humedad y de suelo.





Kimberly A. Nicholas es profesora de ciencias de la sostenibilidad en la Universidad de Lundl, y consultora para viticultores y vinicultores de todo el mundo. Creció en la viña de cabernet sauvignon de su familia, en Sonoma, California.

¿Un cabernet en Carneros? Eso sonaba a herejía. La parte alta del valle de Napa es famosa por su cabernet, pero aquí, donde los valles de Sonoma y Napa se ensanchan y se unen para desembocar en la bahía de San Francisco, las condiciones son más frías y adecuadas para el pinot. Los días templados, las noches y brisas marinas frescas y los suelos arcillosos producen pinots con el sabor de fresas rojas recién cosechadas, y de especias como el cardamomo y la canela. Es el sabor del vino de donde procedo, una impronta que lo hace único y valioso.

Sin embargo, si las temperaturas siguen ascendiendo, el vino elaborado a partir de esas uvas cambiará. De hecho, los cultivadores tal vez deban sustituir las vides por las de syrah o incluso cabernet, pero a riesgo de acabar con la tradición de Carneros y perjudicar las ventas. Mi amigo podría también trasladar sus viñedos más al norte, en busca de climas más fríos; pero las uvas pinot en el nuevo emplazamiento, influidas por la tierra, la humedad y las precipitaciones de allí, carecerían del paladar del pinot de Carneros. O bien podría emplear los conocimientos recientes para modificar sus técnicas de cultivo y mantener así el sabor y el aroma del producto, una tarea ardua.

El cambio climático está empezando a alterar los sabores que el consumidor conoce y espera de los distintos vinos del mundo. Para hacer frente a este reto, los viticultores y los elaboradores de vino están empezando a tomar algunas decisiones difíciles e interesantes. Su capacidad de adaptación para lograr que un pinot de Carneros o un borgoña francés mantengan su sabor característico, así como la posibilidad de que desaparezcan regiones vinícolas de toda la vida y se creen otras nuevas, dependerán de la velocidad con la que se produzcan el cambio climático y las innovaciones.

EL GRAN VINO SE CULTIVA, NO SE ELABORA

Cuando se trata de cultivos básicos como el trigo, el maíz y el arroz, los científicos temen que el aumento de las temperaturas afecte al rendimiento. En el caso de la uva, las temperaturas no amenazan tanto a la cantidad obtenida como a su calidad.

En ciertas viñas de regiones cálidas se busca una alta producción a bajo costo. En el valle Central de California, por ejemplo, los cultivadores de Fresno aspiran a cosechar unas 3 toneladas por hectárea. En 2013 vendieron las uvas a un promedio de 340 dólares la tonelada, y en su mayor parte acabaron en botellas de vino que cuestan menos de 7 dólares.

La versión más romántica de la vinicultura tiene lugar en las tierras más frías a lo largo de la costa de California. Unos 320 kilómetros al norte de Fresno, trabajadores cualificados del valle de Napa cultivan las uvas a mano e intervienen en cada vid hasta una docena de veces a lo largo de la temporada de crecimiento. Limitan a voluntad la producción podando las vides en invierno, de modo que cada brote origina solo unos pocos racimos, y vuelven a examinarlas en verano, cortando los racimos que no alcanzan un nivel óptimo.

Su intención es que la menor cosecha se vea compensada por la calidad, ya que la vid concentrará su energía en producir pocos racimos con sabores y aromas más intensos y complejos. El objetivo consiste en obtener una tonelada por hectárea, una cantidad que en 2013 se vendió a 3680 dólares. Sin duda, la gestión cuidadosa del viñedo contribuyó a este aumento de precio, diez veces superior al de Fresno, pero el factor que más ayudó fue el clima. Una diferencia aparentemente nimia en las temperaturas medias, tan solo 2,5 grados centígrados más frescas, ejerció tal efecto. Como me dijo un cultivador, «ni un genio puede cultivar un buen pinot noir en Fresno. Hace demasiado calor».





LOS VITICULTORES pueden intentar combatir el ascenso de las temperaturas favoreciendo la cobertura foliar o reorientando las hileras de las vides a fin de aumentar el sombreado.

El calor excesivo causa problemas porque las plantas están reguladas por la temperatura. Las uvas destinadas a producir vino muestran especial sensibilidad. Están tan influidas por el entorno en el que crecen que los franceses tienen una palabra para denominarlo: *terroir*. Al igual que el café y otros productos con diferenciación geográfica, el vino refleja su lugar de origen.

La vid genera azúcar a través de la fotosíntesis, y después modifica y recombina este único ingrediente inicial para producir un sinnúmero de compuestos que, una vez en la copa, quizás huelan a frambuesas o hierba recién cortada. La temperatura, la humedad, la luz y el propio suelo determinan la forma en que la vid orquesta esta sinfonía. El vino está constituido por más del 80 por ciento de agua y, por lo general, entre un 12 y 15 por ciento de alcohol, lo que deja tan solo alrededor de un 5 por ciento para los demás componentes. Esta pequeña fracción crea el sabor único de un vino local, un atributo que los cambios en el clima están poniendo en peligro.

Aunque la elaboración del vino exige una gran destreza, casi todos los vinicultores que he entrevistado para mi investigación sobre la respuesta de la industria a los retos ambientales admiten enseguida que la mayor parte de la calidad potencial de un vino está ya definida cuando las uvas se suministran a la bodega. Algunos de los sabores y olores proceden del proceso de elaboración, tal como las levaduras usadas en la fermentación o el envejecimiento en barricas de roble; pero, según me comentó un famoso elaborador, «si en la viña todo se ha hecho bien, mi trabajo consiste solo en no estropearlo. El gran vino se cultiva, no se elabora».

DISTINTO CLIMA, DISTINTO PALADAR

El clima influye enormemente en este cultivo. Según los viticultores, lo hace a tres escalas: el macroclima de la región, como Carneros o Borgoña; el mesoclima de la parcela vitícola; y el microclima de un racimo de uvas bajo la cobertura foliar.

El macroclima está condicionado por la geografía general de la región, que determina las temporadas de cultivo, la temperatura y la pauta de precipitaciones. La temperatura establece cuál de las miles de las variedades de uvas puede cultivarse de manera óptima en un lugar. Así, los brillantes blancos son adecuados para el corto período de cultivo y las frescas temperaturas de Alemania; o los enérgicos tintos de España pueden mantener sus sabores después de un verano largo, caluroso y seco. La temperatura controla cuándo se despiertan las vides en primavera después del letargo invernal y dirige el proceso de crecimiento y maduración. Con el calentamiento global, algunas regiones se están volviendo aptas para la viticultura, como el sur de Inglaterra, mientras que otras zonas cálidas de tradición vinícola, como Australia, están luchando con las altas temperaturas y las frecuentes sequías que llevan a producciones irregulares, niveles de alcohol demasiado altos y sabores desequilibrados.

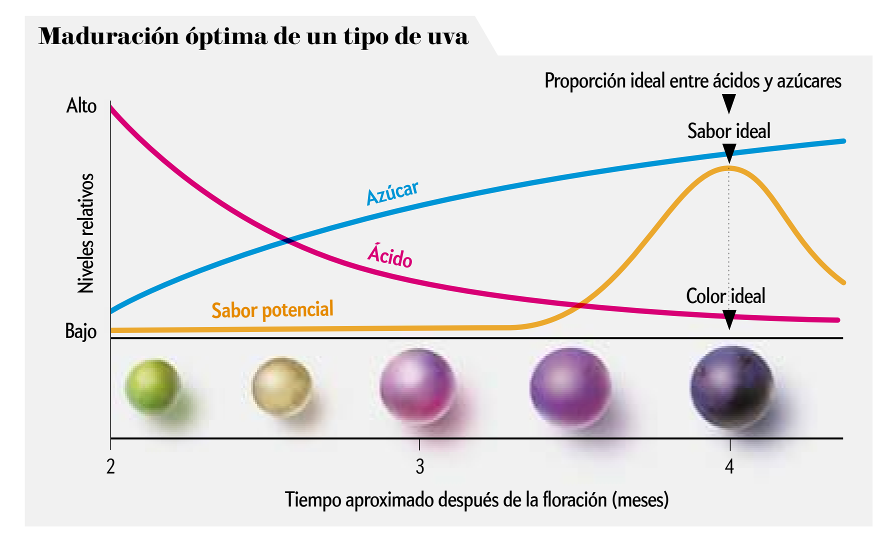
ESTRATEGIA

La vendimia, una decisión difícil

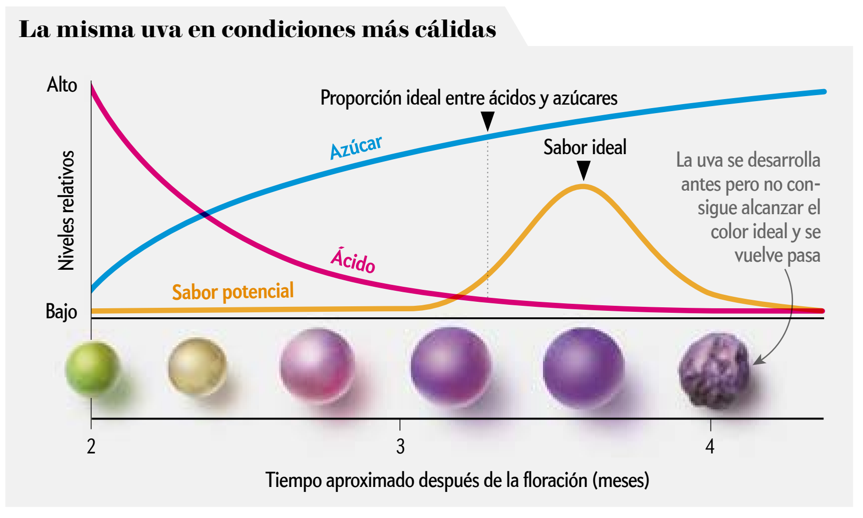
Las uvas para producir vino tardan de tres a cuatro meses en madurar, pero decidir cuándo recolectarlas es complejo. A medida que la uva madura (*arriba*), su nivel de azúcar aumenta y el de acidez disminuye (*curvas azul y roja*). La proporción ideal para un buen vino se da en torno a los cuatro meses. Su sabor global (*curva naranja*), influido por otros compuestos, también alcanza su nivel máximo en un tiempo similar, lo que da lugar a un corto intervalo en el que resulta óptimo vendimiar.

En el futuro la decisión se volverá aún más ardua. A medida que el clima se caliente (*abajo*), la proporción deseada entre ácidos y azúcares se alcanzará antes, todavía en la fase de crecimiento. El momento óptimo de sabor quizá también se adelante, pero no tanto. Ello deja un lapso de tiempo entre el momento óptimo para los ácidos y los azúcares y para el sabor, lo que hace difícil hallar la mejor combinación. También puede suceder que las uvas maduren demasiado deprisa para acumular todo su sabor potencial (el nivel máximo es más bajo en la curva naranja) o para desarrollar el color ideal.

Maduración óptima de un tipo de uva



La misma uva en condiciones más cálidas



JEN CHRISTIANSEN

Sonoma
Napa

Los cultivadores de Napa y Sonoma en California están experimentando distintos modos de compensar el cambio climático, antes que trasladar las vides a otras ubicaciones.

Francia, España e Italia tal vez deban luchar para mantener el sabor de sus vinos tradicionales. El calentamiento quizá favorezca la extensión de los viñedos en el sur de Inglaterra.

Necesidad de adaptación de las regiones vinícolas actuales hasta 2050*

- Muy probable
- Probable
- Poco probable

Aparición de nuevas regiones hasta 2050

- Muy probable
- Probable

**El ascenso previsto de las temperaturas hasta 2050 se basa en que las emisiones de gases de efecto invernadero seguirán aumentando al ritmo actual.*

Los cultivadores de Chile podrían trasladar sus viñedos hacia el sur o hacia lugares más frescos en las montañas. Los argentinos podrían intentar plantar nuevas variedades procedentes de regiones cálidas, como España.

Chile

Las zonas vinícolas se desplazan

La temperatura rige el equilibrio entre azúcares, ácidos y los compuestos responsables del sabor en las uvas. Si el calentamiento del planeta continúa, algunas zonas vinícolas podrían desaparecer y podrían surgir otras nuevas. Pero ¿dónde? Lee Hannah, de Conservación Internacional, Patrick Roehrdanz, de la Universidad de California en Santa Bárbara, y sus colaboradores han elaborado un mapa que muestra cómo el cambio climático podría hacer migrar la industria vinícola y afectar el hábitat de las especies y la disponibilidad de agua potable. Aunque los viticultores podrían trasladar las viñas hacia latitudes más frescas, los suelos y precipitaciones diferentes, y la falta de experiencia en estas otras zonas puede dificultar la obtención de un vino con las mismas características.

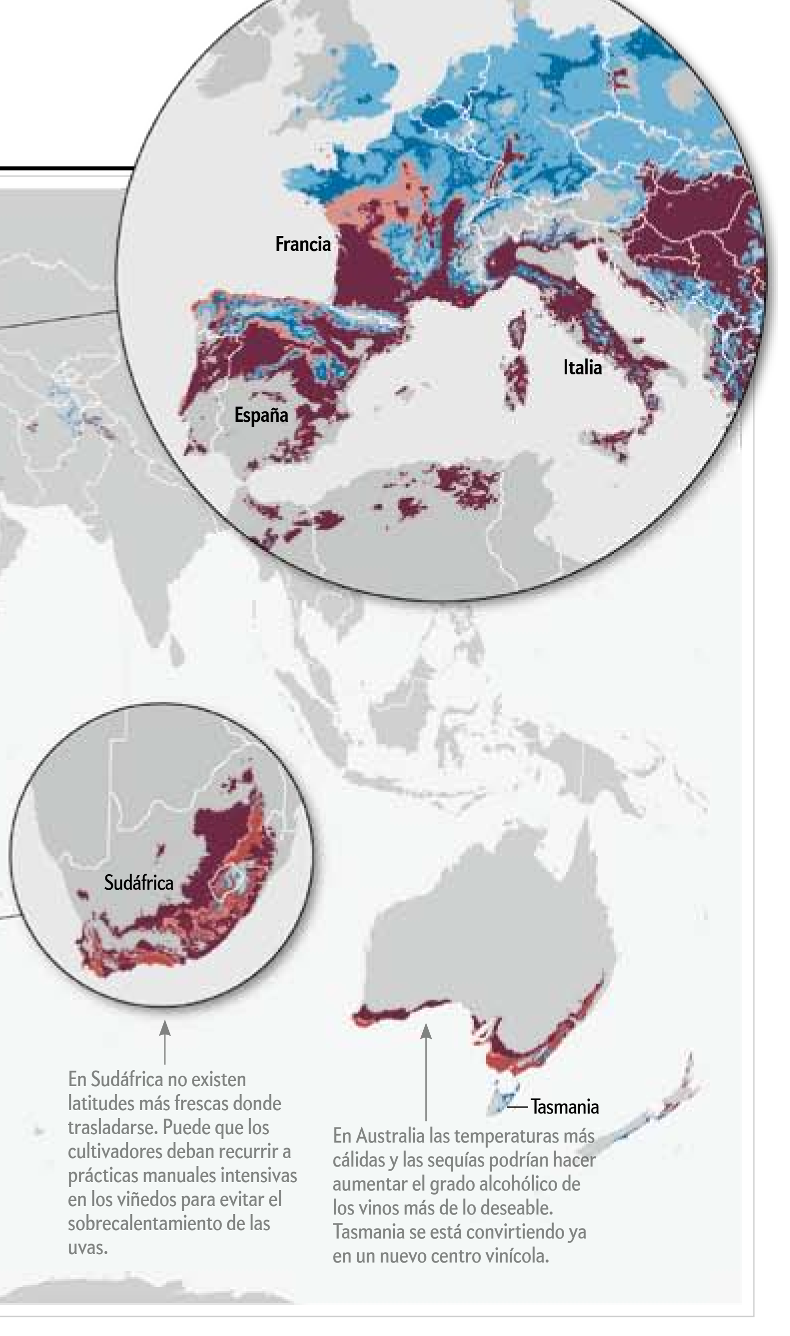
FUENTE: «CLIMATE CHANGE, WINE, AND CONSERVATION», POR LEE HANNAH ET AL. EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*, VOL. 110 N.º 17, 23 DE ABRIL DE 2013 (ESTUDIO DE UN EQUIPO LIDERADO POR LEE HANNAH, DE CONSERVACIÓN INTERNACIONAL Y PATRICK ROEHRDANZ, DE LA U.C.S.B.) DATOS PROPORCIONADOS POR P. ROEHRDANZ

Los cambios en la cantidad y distribución de las lluvias pueden alterar la calidad de las uvas de varias maneras, y la humedad excesiva favorece la putrefacción por hongos. La sequía puede estresar gravemente una planta. Numerosas zonas vinícolas del Nuevo Mundo, entre ellas California, están ampliamente irrigadas, pero la investigación que llevé a cabo con colaboradores de la Universidad Stanford mostró que, incluso en regiones irrigadas, las precipitaciones afectan la producción.

El modo en que el mesoclima contribuye al sabor del vino resulta menos evidente, aunque empieza por determinar el equilibrio entre azúcares y ácidos en las uvas, los componentes básicos del sabor de un vino. Las frutas acumulan azúcar durante la maduración, la cual está directamente controlada por la temperatura. Las uvas maduras contienen una cantidad de azúcar muy alta, alrededor de una cuarta parte de su peso (el doble de la de un melocotón dulce y jugoso). El calor aumenta su cantidad en una proporción predecible, generalmente un 1 o 2 por ciento cada semana durante la maduración. A lo largo de la fermentación el azúcar se convierte en alcohol, por lo que con uvas más dulces se obtienen niveles de alcohol más elevados en el vino. En las últimas décadas, el ascenso de las temperaturas ha favorecido una tendencia mundial hacia vinos con mayor contenido alcohólico. La mayor graduación es percibida como un sabor fuerte y más amargo, una cualidad que puede dominar o alterar las percepciones organolépticas más sutiles.

Los ácidos, que ofrecen el contrapunto a los azúcares, constituyen la otra cara de la moneda. Presentes en abundancia en las uvas verdes, se descomponen en parte a medida que estas maduran. Proporcionan un sabor punzante y refrescante al vino. Las regiones vinícolas más frías han plantado variedades que maduren con rapidez durante la corta temporada de crecimiento y aun así mantengan agradables niveles ácidos, no demasiado altos. Con el ascenso de las temperaturas, los vinos de climas fríos, como el riesling alemán, pueden perder su frescor, ya que el agudo sabor de los ácidos se desvirtúa con el calor.

Hace mucho tiempo que los viticultores estudian el azúcar y los ácidos, pero en los últimos años han empezado a descubrir cuán esenciales resultan los componentes minoritarios del vino en las sensaciones que experimentamos al beber. Por ejemplo,



XNR PRODUCTIONS (*mapa*)

los compuestos fenólicos son importantes para el color. Antes de sorber un poco de vino, lo observamos en la copa, donde su color conforma nuestra percepción global. En un experimento, incluso catadores expertos usaron las características del vino tinto para describir el paladar de un vino blanco que se había teñido de rojo. El zumo de las uvas clásicas (del Viejo Mundo) no está pigmentado; el color de los vinos procede de unos compuestos fenólicos llamados antocianinas, que se hallan en la piel. Estas sustancias están muy extendidas en la naturaleza; son las responsables del color azul de los arándanos o el morado de las berenjenas. Al prensar las uvas después de la vendimia, las variedades tintas se dejan en contacto con los hollejos durante las semanas de fermentación para transferir el color al zumo. Las uvas de vino blanco presentan menos compuestos fenólicos y suelen prensarse separadas de las pieles al principio del proceso.

En la uva los compuestos fenólicos se generan por exposición al sol, aunque los vinos de los climas más cálidos tienden a poseer colores demasiado claros. Sin embargo, las investigaciones sugieren que los cambios de la temperatura media no son lo único que cuenta; un aumento por encima de unos determinados límites puede llevar a consecuencias no lineales que disminuirán la cantidad de antocianinas.

El microclima del viñedo determina también la composición en taninos, que dan la textura al vino, sea esta astringente o suave. Los taninos son asimismo compuestos fenólicos y toman el nombre de su antiguo uso para la industria de curtir pieles (tenería). Presentan un gusto tan desagradable que impiden que los animales consuman la fruta o evitan las plagas antes de su maduración. En boca se combinan con las proteínas en la saliva, y secan la lengua y las encías, lo que produce una sensación que influye en el paladar del vino. Tienen también un sabor amargo. En una proporción equilibrada, los taninos ayudan a saborear la comida: al limpiar físicamente el paladar y extraer las grasas de los receptores gustativos, permiten degustar más plenamente cada bocado. Un excesivo calor o insolación pueden reducir la cantidad de taninos, lo que da lugar a vinos menos equilibrados.

¿CUÁNDO VENDIMIAR?

Llegados a este punto, nos quedan los compuestos minoritarios, que explican la mayor parte del carácter peculiar de un vino. Estas sustancias resultan esenciales, en especial para el aroma. A menudo, cuando se cata un vino, primero se lo hace girar en la copa para olerlo a continuación. La agitación hace volatilizar ciertas sustancias que se unen a los receptores de nuestra nariz; estos envían señales al cerebro, que son interpretadas como un sabor (en el que se integran distintas percepciones sensoriales). La mayoría de las sensaciones que comúnmente percibimos como sabor son proporcionadas por nuestro refinado sentido del olfato. De ahí que la comida sepa tan insípida cuando se está resfriado; la congestión impide que los compuestos aromáticos lleguen al interior de nuestra nariz, vía retronasal, por la parte posterior de la boca. Si se intenta comer con la nariz tapada un trozo de manzana dura y de patata cruda peladas, sorprenderá lo difícil que resulta distinguirlos. La cata de vinos podría denominarse de forma más rigurosa «olfateo de vinos», aunque suene menos atractivo.

Los vinicultores e investigadores están indagando en los compuestos minoritarios que determinan el aroma y el sabor, los cuales pueden presentarse de numerosas maneras. Los que se hallan en las uvas suelen acumularse en las últimas fases de la maduración, y se sabe que en ese momento su formación depende de la temperatura. La maduración del sabor puede tener lugar a un ritmo distinto de la del azúcar, el parámetro que tradicionalmente rige las decisiones sobre la vendimia. En vez de recoger las uvas cuando alcanzan un nivel dado de azúcar, muchos vinicultores resuelven cuándo cosechar después de probar las uvas en el viñedo, buscando los sabores y aromas que imaginan que se traducirán en grandes vinos. En general, el sabor progresa de manera continua, desde el de frutas verdes y hortalizas a frutos rojos (frambuesas), negros (moras) hasta, finalmente, el de la fruta confitada, como las uvas pasas.

En algunas regiones esa estrategia ha llevado a demorar la vendimia, al dejar más tiempo la fruta en la vid para lograr un mejor desarrollo del sabor. A algunos viticultores tal vez no les guste este enfoque, porque las uvas pierden agua y ello puede significar menos peso y menos ingresos. Además, cuanto más tiempo permanezca la fruta en la planta, tanto más aumentará su contenido en azúcar, lo que quizá fuerce a los vinicultores a añadir agua al zumo para conseguir al final el nivel adecuado de alcohol.

Los investigadores están intentando entender mejor la influencia de los más de 1000 compuestos del aroma del vino en

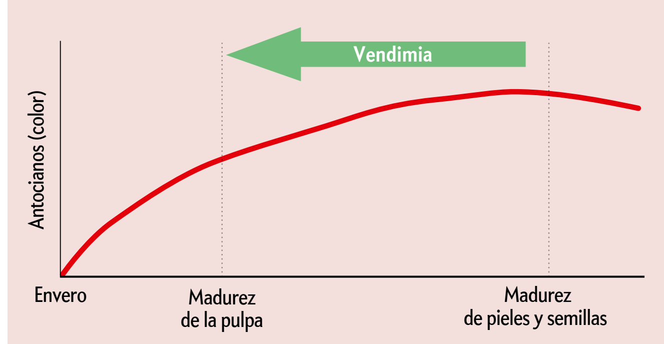
El futuro de la vitivinicultura en España

En nuestra región, especialmente afectada por el cambio climático, se estudian estrategias novedosas de elaboración de vinos para evitar su pérdida de calidad

FERNANDO ZAMORA MARÍN

En 1896, Svante August Arrhenius fue el primero en formular la teoría de que las emisiones de CO_2 procedentes de la combustión del carbón provocarían un efecto invernadero en la atmósfera que comportaría el calentamiento global del planeta. Ahora bien, al ser Arrhenius natural de un país frío (Suecia), consideró que este fenómeno tendría efectos positivos sobre la agricultura de su país. Desgraciadamente, en zonas más cálidas, como la península ibérica, los efectos del cambio climático pueden considerarse claramente negativos para la agricultura en general y para la vitivinicultura en particular.

Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, la temperatura media de la Tierra aumentó 0,6 °C durante el siglo XX. Asimismo, está previsto que se eleve como mínimo otro grado en 2050 y más de dos en 2100. Cabe señalar que se trata de datos medios referidos al conjunto del planeta, pero pueden ser superiores en algunas zonas. En la península ibérica, donde el pasado siglo la temperatura ascendió 1,5 °C, se piensa que alcanzará valores por encima de la media mundial. Ante tal panorama, podemos preguntarnos qué consecuencias tendrá el cambio climático sobre la calidad de nuestros vinos y qué estrategias deberían adoptarse para paliar sus previsibles efectos negativos.



A partir del envero, las uvas van adquiriendo color (sobre todo, a causa de los pigmentos antocianos) y aumenta su concentración en azúcares. Esta última suele emplearse para determinar la fecha de la vendimia. Pero con el cambio climático la madurez de la pulpa se avanza y ello obliga a vendimiar antes. Sin embargo, en ese momento los hollejos y las semillas todavía no están maduras, lo que da lugar a vinos blancos menos frescos y más pobres en aromas, y a vinos tintos con peor color, mayor astringencia y sabor más amargo.

En este contexto, debemos distinguir entre lo que acontece en las zonas vinícolas frías y en las cálidas. En las primeras, donde tradicionalmente se producen vinos de gran acidez y aromas delicados e intensos, se empieza a observar que estos se han vuelto más simples, menos complejos y menos longevos. Así, en las clásicas zonas productoras de vinos tintos pinot noir, como Borgoña y Oregón, se comienzan a detectar dichos efectos negativos. No obstante, algunas de las regiones más frías de Nueva Zelanda o Chile, donde antes los vinos no eran tan apreciados, empiezan a adquirir fama mundial por la calidad de sus maravillosos blancos de *sauvignon* o de sus tintos de pinot noir, que han desarrollado aromas más intensos y han ganado en complejidad.

En las zonas cálidas, como en la península ibérica, el problema es distinto. El cambio climático conlleva primaveras secas y veranos muy cálidos. En estas condiciones, la uva adquiere con rapidez una alta concentración de azúcares y su acidez decrece drásticamente. Ello obliga a adelantar las fechas de vendimia para evitar un excesivo grado alcohólico y conservar el frescor de los vinos.

Sin embargo, las pieles y las semillas, que confieren al vino importantes propiedades, como color, astringencia y aromas, no maduran al mismo ritmo que la pulpa, sino que lo hacen más tarde. Tal desfase da lugar a vinos blancos más pesados (poco frescos, que se vuelven duros en el paladar), menos aromáticos y más frágiles (lo que significa que en poco tiempo se deteriorarán); por lo que respecta a los tintos, estos presentan menos color, peor aroma, mayor astringencia, sabor más amargo y menor longevidad. Ante tal desafío, los elaboradores, especialmente los de vinos tintos, suelen retrasar la vendimia para que hollejos y semillas alcancen la madurez adecuada, lo que da lugar a vinos con un grado alcohólico cada vez mayor y una acidez insuficiente. Esta es la razón por la que la mayoría de los tintos españoles ha incrementado su graduación de forma notable durante los últimos años.

Esa problemática afecta en mayor grado a ciertas variedades y denominaciones de origen. Tal es el caso del monastrell en Jumilla o de la garnacha en el Priorato, los cuales, para adquirir la madurez adecuada de pieles y semillas necesitan alcanzar graduaciones alcohólicas enormes, en ocasiones por encima de los 16 grados. En cambio, los vinos blancos de zonas más frías, como Galicia o Rueda, se han vuelto más frescos y aromáticos, lo que les ha hecho adquirir una mayor cuota de mercado.

la percepción del sabor. Se trata de una tarea difícil, porque algunos se presentan en concentraciones muy bajas, y la sensibilidad a ellos puede variar de una persona a otra en cientos o miles de veces. Por ejemplo, en el olor a fresa intervienen más de 200 compuestos, y los que provocan tal percepción en un individuo pueden ser diferentes de los que lo hacen en otro. (No hay que temer, por tanto, en no dar con la respuesta «correcta» en una cata de vinos: ¡no la hay!)

A veces, ciertos compuestos clave son los que se hallan detrás de un olor característico, por lo que entender su efecto en nuestros sentidos puede ayudar a los cultivadores a mejorar su producto. En los años ochenta, Hildegarde Heymann, de la Universidad de California (UC) en Davis, siguió una corazonada y descubrió que un compuesto denominado metoxipiracina, responsable del indeseable aroma de pimiento en el cabernet sauvignon, se destruye con la luz. Los cultivadores cambiaron sus prácticas de emparrado para reducir la sombra sobre las frutas, con lo que el cabernet de California mejoró mucho. Varias investigaciones más recientes dirigidas por Claudia Wood y sus colaboradores en Australia, Chile y Alemania identificaron un

Hoy disponemos de técnicas y de medios humanos cada vez mejor preparados para tratar de corregir los efectos del cambio climático. La ósmosis inversa o la evaporación selectiva al vacío permiten reducir parcialmente el contenido en alcohol sin alterar apenas la calidad sensorial. Asimismo, la electrodiálisis o el intercambio catiónico permiten modificar la acidez para adaptarla a los valores idóneos.

Progresos científicos

Por otro lado, en España se están logrado importantes avances hacia la comprensión de los efectos del cambio climático en la vitivinicultura y sobre cómo hacerle frente. La principal iniciativa científica que ha abordado esta cuestión en el conjunto del territorio ha sido el Proyecto Cenit Deméter (acrónimo de «Desarrollo de Estrategias y Métodos vitícolas y Enológicos frente al cambio climático. Aplicación de nuevas Tecnologías que mejoren la Eficiencia de los procesos Resultantes»). Los estudios se llevaron a cabo de 2008 a 2011 y en ellos participaron 27 empresas españolas del sector vitivinícola y 31 grupos de investigación españoles pertenecientes a 17 centros públicos de investigación y 5 centros tecnológicos.

En este amplio proyecto se ha profundizado en el conocimiento de cómo la temperatura ambiental y la disponibilidad de agua afectan al desarrollo de la vid y a la expresión de los genes relacionados con el proceso de maduración de la uva; se ha explorado cómo se adaptan las levaduras y bacterias a la nueva composición de mostos y vinos; se han desarrollado nuevos métodos de determinación de la madurez fenólica y aromática; se han diseñado nuevas estrategias de riego del viñedo para mejorar el proceso de maduración; se han planteado nuevas estrategias de vinificación destinadas a paliar los efectos de una madurez inadecuada de las uvas; y se han estudiado los factores que determinan la calidad y la persistencia de la espuma de los cavas.

Nuestro grupo de investigación también ha participado en dicho proyecto, además de en otros menos extensos que han abordado la misma temática. En concreto, hemos estudiado los efectos del cambio climático, y las posibles acciones para paliarlos, sobre la madurez de las uvas y, en consecuencia, sobre la calidad de los vinos tintos y los cavas. Para ello elaboramos vinos y cavas a partir de uvas que habían alcanzado diferentes niveles de madurez. Determinamos su color, contenido en taninos y astringencia en el caso de los vinos tintos, y la calidad y persistencia de la espuma en el caso de los cavas.



La capacidad de un cava para producir espuma, medida aquí con un equipo MOSALUX, aumenta si se adelanta la vendimia en los años cálidos.

CORTESÍA DE FERNANDO ZAMORA MARÍN

Hemos verificado que la madurez de la uva se ve claramente afectada por el cambio climático, lo que provoca un desfase entre la madurez de la pulpa y la de pieles y semillas, como se ha comentado antes. Por otro lado, se han optimizado los métodos para determinar la madurez fenólica de las uvas tintas, lo que permite decidir mucho mejor el momento óptimo de la vendimia. También hemos comprobado que, en la elaboración de vinos base para cava, es mejor vendimiar cuando lo aconseja la acidez de la uva que cuando se alcanza el contenido adecuado de azúcares. Los cavas que se obtienen presentan una persistencia de la espuma más estable y son mejor valorados por los degustadores.

Y, por último, hemos desarrollado técnicas de vinificación destinadas a paliar los efectos negativos del cambio climático. En el caso de los vinos tintos se ha verificado que la criomaceración (la refrigeración de la uva cosechada para retrasar el inicio de la fermentación) permite obtener vinos de mejor color y aroma, y con menor astringencia. Asimismo, se ha comprobado que la eliminación de las semillas y la desalcoholización parcial pueden ser de gran utilidad. Respecto a los cavas, se ha visto que si en los años cálidos se adelanta la vendimia, se aplica una correcta nutrición nitrogenada y se realiza la segunda fermentación a muy baja temperatura, se obtiene una mejor calidad y persistencia de la espuma.

En la actualidad, nuestros esfuerzos se centran en el estudio de la relación entre la composición del vino tinto y su astringencia y sabor amargo; y también en determinar los efectos del cambio climático en dicha composición, lo que ayudará a diseñar estrategias dirigidas a atenuarlos.

A pesar de la innegable influencia negativa del cambio climático y de la preocupación que despierta, puede afirmarse que la calidad del vino español es hoy en su conjunto mucho mejor que nunca. Nuestro sector vitivinícola ha progresado enormemente durante los últimos años y está preparado para afrontar este reto.

Fernando Zamora Marín *dirige el grupo de investigación en tecnología enológica en la facultad de enología de Tarragona, de la Universidad Rovira i Virgili.*

único compuesto, la rotundona, como el origen del deseable aroma de pimienta negra del syrah; otro trabajo sugiere que tal sustancia tiende a concentrarse más en las uvas de los lugares y los años más frescos.

HACER FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO

El conocimiento de todos los elementos que influyen en el sabor de un vino puede ayudar a los cultivadores a pensar sobre los posibles modos de adaptarse al cambio climático. La acción más drástica consistiría en desplazarse a otra región, por ejemplo, de California a Oregón; otra menos radical sería trasladarse dentro de la misma región, quizá de los valles más calurosos a las laderas más frescas. Algunos estudios han valorado estas opciones, pero solo se han centrado en los cambios de temperatura previstos y no han tenido en cuenta otros importantes factores ambientales. Sobre la base de estos pocos análisis, algunos artículos de la prensa sensacionalista han llegado a declarar en riesgo ciertas regiones vinícolas, en las que han pronosticado una disminución de la calidad y la cantidad de la uva.

Varios motivos dificultan el traslado de un viñedo. Para obtener vinos de alta calidad se requieren suelos apropiados que proporcionen los nutrientes correctos, además de un suministro adecuado de agua; y puede que las nuevas ubicaciones no reúnan tales condiciones. Tal vez ni siquiera queden suelos cultivables. Cambiar de lugar una empresa y su infraestructura resulta difícil y caro; los nuevos viñedos tardarían cinco o seis años en funcionar a pleno rendimiento y quizás unos veinte en empezar a dar beneficios. Además, muchos viticultores poseen un fuerte arraigo hacia sus tierras, cultivadas durante generaciones, de las que tal vez no quieran desprenderse. También los consumidores pueden sentirse vinculados a dichos lugares. Las regiones que van volviéndose lo bastante cálidas para producir vino necesitarán tiempo para adquirir los conocimientos y técnicas que permitan identificar las zonas más productivas donde plantar, controlar las plagas y enfermedades; y también para desarrollar la identidad y el estilo local que los compradores aprecian.

¿Y qué decir acerca de la selección y crianza de los distintos vinos para que se ajusten a un entorno cambiante? Aunque casi todas las uvas que se emplean para producir vino proceden de una única especie del Viejo Mundo, *Vitis vinifera*, existen miles de tipos de ella, denominadas variedades. Los viticultores han seleccionado algunas porque se adaptan a un determinado entorno, del mismo modo que se han seleccionado ciertas variedades de perros para arrastrar trineos en Iditarod o para que quepan en el bolso de Paris Hilton.

Pero si elegimos simplemente una uva que rinde bien en un sitio y la cultivamos en otro lugar, quizá no nos proporcione el mismo delicioso sabor. Por ejemplo, en Francia se seleccionaron clones (esquejes genéticamente idénticos procedentes de una misma cepa) de uvas pinot noir de Dijon para que maduraran rápidamente y rindieran vinos de calidad, y se cultivaron en la fresca región de Borgoña; allí adquirieron reputación por los grandes vinos que produjeron. En California, con temperaturas más cálidas, se ha plantado esta variedad en vastas extensiones, pero con una maduración más rápida y en un medio diferente, el vino no siempre alcanza el mismo apreciado sabor. Si se introducen variedades de regiones cálidas como España en nuevas zonas donde están ascendiendo las temperaturas, quizá se logren sabrosos vinos, pero el tanteo por ensayo y error puede requerir muchos años.

La obtención de nuevas variedades que soporten el calentamiento global es un área de investigación muy activa para algunos cultivos alimentarios básicos, pero tiene unas posibilidades más limitadas en el caso de las uvas de vinificación. La mejora genética puede tardar una década o más, pero los principales obstáculos son culturales. La ley de denominación francesa, por ejemplo, especifica que en ciertas regiones solo pueden cultivarse determinadas variedades si han de llevar la denominación de origen de la región, como la de Burdeos (si bien una variedad más reciente denominada marselan, un cruce entre cabernet sauvignon y garnacha, fue legalizada en los años noventa en la denominación Colinas del Ródano). En todo el mundo los consumidores suelen mantenerse fieles a sus variedades favoritas, y la aparición de una nueva puede tener muchas dificultades para penetrar en el mercado.

En un viñedo ya existente, los cultivadores pueden intentar combatir el cambio climático mediante distintas estrategias de plantación. Tienen la posibilidad de cambiar la dirección de las hileras de las plantas, dirigir de cierto modo el crecimiento de las vides o modificar la manera de sostenerlas con espalderas para que dispongan de más sombra a medida que la temperatura asciende. Pueden también injertar sobre un pie ya establecido una nueva variedad que tolere mejor el calor. Sin embargo, tan importantes decisiones suelen tomarse una sola vez, al inicio de un largo ciclo de vida de la viña.

Otras decisiones menos drásticas quizá contribuyan también a la adaptación. Está claro que los viticultores no pueden modificar el macroclima de su región, mientras que, a escala del mesoclima del viñedo, el control de la temperatura tiene escasas opciones, como el riego por aspersión o los umbráculos. Pero sí pueden sacar partido de la cantidad y la posición de las hojas para refrescar el microclima de la uva madura, de manera que esta retenga mejor los compuestos responsables del sabor y el aroma.

Mis mediciones en los viñedos de Carneros en California revelaron valores muy elevados de insolación (más del triple que los señalados en estudios anteriores) en las uvas de más de 500 vides de pinot noir. Todos los brotes y hojas se sujetaron rígidamente sobre los racimos mediante alambres, con el fin de proporcionar una mayor circulación de aire y reducir las plagas. En los análisis realizados con mis colaboradores en Stanford y la Universidad de California en Davis mostramos que, por cada uno por ciento de aumento de la insolación, se reducían más de

CÓMO DISTINGUIR LOS SABORES

Cata de vinos doméstica

Todo el mundo puede aprender a catar el vino de forma más analítica, sin necesidad de seguir a los críticos profesionales. Se trata de saber identificar los componentes del vino y asociarlos a términos descriptivos relevantes. Diferentes personas pueden presentar percepciones iniciales distintas de cierto sabor, por lo que los participantes en un experimento de cata de vinos deben oler primero muestras conocidas, como moras, para ponerse de acuerdo sobre qué significará para ellos «moras». Después, entran en cabinas individuales, suavemente iluminadas con luz roja para que todos los vinos parezcan del mismo color. Un investigador introduce entonces una bandeja con vinos numerados, y los participantes los valoran en una pantalla de ordenador.

En casa, usted puede simplificar este procedimiento y hacerlo más divertido. Primero puede pedir a un grupo de amigos que traigan una variedad específica de vino, por ejemplo syrah. Su trabajo como anfitrión consiste en buscar muestras con los sabores que suele presentar este vino: pimienta negra, moras, clavo. Ponga cada una de ellas en una copa y tápela con un papel para confinar los compuestos aromáticos. Una vez sus invitados se hayan sentado, haga circular las copas para que huelan las muestras estándar. A continuación, deben catar cada vino para juzgar qué sabores reconocen y con qué intensidad.

Puede recurrir a la rueda de aromas desarrollada por Ann Noble. En el centro de esta se ubican categorías de aroma muy amplias, tales como el afrutado o el especiado. Cada una de ellas se hace más precisa hacia la periferia: primero aroma afrutado, después de frutos rojos, y después de frambuesa. Aprender a experimentar el mundo sensorial con más detalle puede hacer mucho más agradables las horas del día dedicadas a preparar y saborear la comida.

un dos por ciento los taninos y las antocianinas. Cambiar el tipo de espalderas verticales para proporcionar más sombra a la uva puede ayudar a mantener dichos compuestos y, naturalmente, a enfriar la fruta.

Aunque la mayor parte del paladar de un vino proviene de la uva, los vinicultores pueden intervenir en la fase de procesado para intentar conservar el sabor de un vino local. Si, al devenir más cálida la zona, los ácidos se pierden con excesiva rapidez, estos pueden añadirse luego en la bodega. Cuando las uvas acumulan demasiado azúcar, al fermentar dan niveles altos de alcohol que tal vez oculten los sabores más finos y delicados. Puede emplearse entonces la ósmosis inversa u otras técnicas para eliminar el exceso de alcohol. Sin embargo, tales maniobras son poco precisas y no pueden corregir por completo los sabores que se generan en la viña.

Conseguir el mejor sabor a partir de un terreno dado es una habilidad que exige años de duro trabajo. Algunos expertos de la industria creen que las regiones del Nuevo Mundo como Napa y Sonoma están todavía buscando su mejor *terroir*. Jason Kesner me dijo hace algunos años, cuando era gerente de un viñedo de calidad de Napa-Carneros, que aún faltaban generaciones para que los viñedos de la región alcanzaran su máximo nivel. «Tardamos una generación en hacer crecer una viña», comentó, «y después les toca a nuestros hijos descubrir cómo plantarlas de un modo distinto, y más tarde nuestros nietos deben perfeccionarlo. Por eso los franceses tienen unas viñas tan increíbles; sencillamente han contado con más tiempo para aprender». Sin embargo, debido a la sensibilidad de las uvas al clima, si este cambia, aunque solo sea un poco, el conocimiento y técnicas que se han ido optimizando a lo largo de generaciones pueden perder relevancia, incluso en un territorio muy familiar.

REGIONES CAMBIANTES

Incluso si son relativamente jóvenes, un cabernet de Napa y un pinot de Carneros tienen sus propios rasgos y sus partidarios. «Abrí la botella de vino y olía a Carneros», me dijo poéticamente Debby Zygielbaum, de las bodegas Robert Sinskey en Napa. Si el cambio climático llegara a alterar el aroma y el sabor de esas uvas, podría perjudicar sus regiones productoras. Si bien el calentamiento tal vez mejore el cultivo del vino en algunas de las áreas más frescas, como Tasmania, es muy probable que los cambios afecten a los principales centros vinícolas, que tienen sus procesos de producción adaptados a las condiciones actuales. Según nuestras investigaciones, una primavera con un incremento de la temperatura media superior a 1 grado centígrado podría reducir el rendimiento de las vides de California. Otro ejemplo es el precio de las uvas pinot noir en esta región, que cae en picado cuando la fruta madura por encima de su umbral de temperatura óptima.

Los viticultores y vinicultores cuentan con algunas opciones técnicas para adaptarse, tal como hemos visto, pero queda por demostrar si estas resultarán siempre suficientes. ¿Hasta qué punto tales estrategias nos ayudarán a obtener un vino que pueda sustituir al que nos ofrecía el sabor singular de una zona? En última instancia, existen límites biofísicos y económicos para la adaptación.

Los informes científicos más recientes apuntan que si el mundo sigue con la actual pauta de uso de combustibles fósiles, la temperatura media global aumentará entre 2,6 y 4,8 grados centígrados en unas pocas generaciones. Este aumento puede parecer poca cosa, pero piénsese que el valor inferior de este intervalo corresponde aproximadamente a la diferencia de temperaturas actual entre Napa y Fresno; y el valor superior, a la que existe entre el vino de la ciudad de Lodi, en el Valle Central de California, y Houston. Aunque los viticultores son ingeniosos y creativos, difícilmente cabe imaginar que Houston vaya a convertirse en el próximo valle de Napa.

El vino es un mensaje escrito dentro de una botella, capturado para nuestro disfrute. Nos permite visitar partes del mundo que quizá nunca veamos en persona. Refleja la fabulosa diversidad ambiental y cultural del planeta, al igual que la profunda dependencia de la humanidad respecto de la naturaleza, y nos proporciona todo lo que necesitamos para vivir y muchas de las cosas que hacen que la vida merezca la pena. Hoy estamos en vías de alterar profundamente la vida en la Tierra. A menos que adoptemos pronto cambios importantes, la merma de sabor de los vinos de mi ciudad natal quizá represente una de las pérdidas menos preocupantes.



LOS VITICULTORES de las bodegas Robert Sinskey en Napa se aseguran de que el vino que está fermentando entre en contacto con las pieles de las uvas, con el objetivo de extraer al máximo el color y los taninos.

CORTESÍA DE BODEGAS ROBERT SINSKEY

PARA SABER MÁS

Farm-scale adaptation and vulnerability to environmental stresses: Insights from winegrowing in northern California. Kimberly A. Nicholas y William H.Durham en *Global Environtmental Change*, vol. 22, n.º 2, págs. 483-494, 2012.

Climate change, wine, and conservation. Lee Hannah et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 110, n.º 17, págs. 6907-6912, 23 de abril de 2013.

Adapting red winemaking to climate change conditions. F. Zamora en *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin, Spécial Laccave*, págs. 71-76, 2014.

Influence of grape maturity on the foaming properties of base wines and sparkling wines (cava). M. Esteruelas et al. en *Journal of the Science of Food and Agriculture*, vol. 95, págs. 2071–2080, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Vinos, vides y clima. P. Wagner en *IyC*, octubre de 1976.

Bases de la tipicidad de los vinos. R. Bessis, N. Leneuf y J. C. Fournioux en *IyC*, febrero de 1995.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

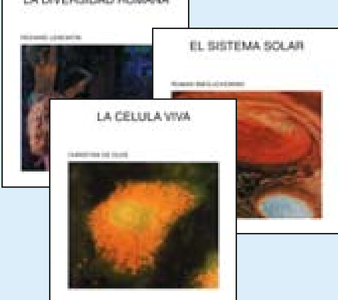
BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



Para efectuar tu pedido:

Teléfono: (34) 934 143 344

A través de nuestra Web:

www.investigacionyciencia.es

GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia

(*) Disponible solo en formato digital



TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física

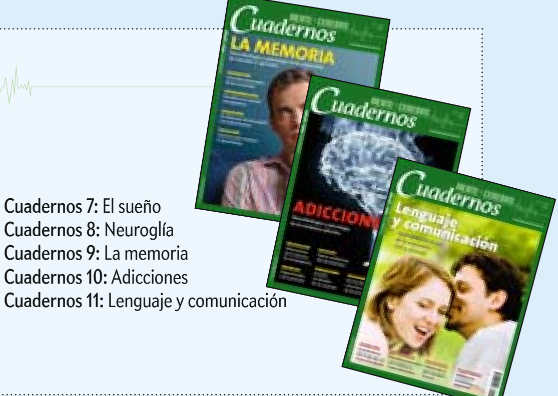
(*) Disponible solo en formato digital





Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación



por Carlos Iván Espinosa y Luis Cayuela

Si eres investigador en el campo de las ciencias de la vida y la naturaleza, y tienes buenas fotografías que ilustren algún fenómeno de interés, te invitamos a participar en esta sección. Más información en **www.investigacionyciencia.es/decerca**

Biodiversidad escondida

Las regiones tropicales albergan numerosas especies aún no descritas por los científicos que podrían hallarse amenazadas

La Tierra es un planeta diverso. Aunque nuestro conocimiento sobre las especies ha aumentado de forma notable durante el último siglo, la realidad es que aún nos hallamos muy lejos de tener un inventario exhaustivo de todas las especies que habitan en ella. Los trópicos concentran la mayor diversidad del planeta; sin embargo, son las regiones menos conocidas y, desafortunadamente, también las que sufren mayores amenazas. Conocer la diversidad que estas zonas albergan es prioritario para poder establecer acciones de manejo y conservación y frenar así la extinción de especies.

Las expediciones científicas desempeñan una función clave a la hora de configurar un mapa de la biodiversidad a escala mundial. En julio de 2014, un equipo de investigadores españoles y ecuatorianos realizamos una expedición al valle del Nangaritza, una región casi inexplorada en el sur de Ecuador. Tras poco menos de dos semanas se tomaron cerca de 1000 muestras de líquenes y 500 de plantas, entre ellas orquídeas, palmas, árboles y arbustos; también se obtuvieron numerosos registros (fotos, huellas, excrementos) de mamíferos y aves, unos 200 especímenes de mariposas y polillas, así como un sinfín de especies de arañas, escarabajos y abejas, muchos de los cuales ofrecerán datos novedosos para la ciencia. Las cifras pueden parecer impresionantes, pero es muy posible que representen solo la punta del iceberg de lo que queda aún por descubrir.

—Carlos Iván Espinosa
Dpto. de ciencias naturales
Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
—Luis Cayuela
Dpto. de biología, geología, química inorgánica y física
Universidad Rey Juan Carlos, Madrid



EL RÍO NANGARITZA, en la frontera entre Ecuador y Perú, es bordeado por la tupida selva amazónica.



LA LAGARTIJA DE PALO GARGANTIRROJA (*Enyalioides rubrigularis*) fue descubierta en 2009. Incluso para grupos de organismos bien conocidos como los reptiles, los trópicos siguen escondiendo especies aún no descritas.

TOMA DE MUESTRAS de líquenes que crecen sobre la corteza de un árbol. En las regiones tropicales hay muy poco conocimiento sobre estos vegetales, por lo que resulta bastante fácil descubrir nuevas especies de este grupo.

MEDIANTE GUÍAS DE CAMPO Y CLAVES TAXONÓMICAS, se comparan diferentes características de las especies capturadas con las de las especies ya conocidas. Así puede determinarse si una especie es nueva para la ciencia. En la imagen, eufonia ventrinaranja (*Euphonia xanthogaster*).

por Evandro Agazzi

Evandro Agazzi es el presidente de la Academia Internacional de Filosofía de las Ciencias en Bruselas.



En busca de la objetividad

Ante la dificultad de alcanzar la verdad, la ciencia se ha centrado en el conocimiento objetivo

Entre el final del siglo xix y el inicio del xx tuvo lugar la llamada crisis de los fundamentos en las ciencias exactas (matemática y física). En realidad, se convirtió en una crisis de confianza en la capacidad de la ciencia de conseguir la verdad.

En el mundo matemático, los debates acerca del postulado euclidiano de las paralelas («Por un punto exterior a una recta dada solo cabe trazar una paralela a la misma») habían tomado un giro decisivo ya en el siglo xix. Se construyeron sistemas geométricos que contenían la negación del mismo: si postulamos que no pasa ninguna recta, obtendremos una geometría esférica; si postulamos que pasan infinitas, tendremos una geometría hiperbólica, ambas no euclidianas. Los matemáticos de la época buscaron, sin éxito, contradicciones en estas geometrías no euclidianas. Entonces, dijeron algunos, todas ellas serán verdaderas. Pero, por otra parte, cada una contiene proposiciones opuestas a las de las otras, por lo que una sola debería ser la verdadera y las otras falsas. Ahora bien, como no había forma de decidir cuál podría ser la verdadera, la conclusión que se impuso fue que no eran ni verdaderas ni falsas, eran puros sistemas formales hipotético-deductivos sin pretensión de verdad. Y esta perspectiva formalista se extendió de inmediato a otras muchas ramas de la matemática.

En cuanto a la física, los desarrollos de la mecánica newtoniana habían permitido absorber en ella disciplinas como la acústica o la óptica. Pero en las últimas décadas del siglo xix habían fracasado ya los esfuerzos por reducir a la mecánica los fenómenos de la termodinámica y del campo electromagnético. En los albores del siglo pasado, además, la teoría de la relatividad y la física cuántica indicaban que incluso algunos conceptos y principios fundamentales de la mecánica newtoniana —que hoy llamamos clásica— resultaban inaplicables. Ello se consideró una prueba de que dicha mecánica se había revelado como falsa.

La consecuencia que extrajeron numerosos científicos y filósofos, empezando por Ernst Mach, fue que la ciencia en cuanto tal no tenía ni la tarea ni el fin de hacernos conocer lo que es la realidad, sino simplemente la función de ofrecernos esquemas intelectuales útiles para organizar nuestras percepciones sensoriales y para hacer previsiones al objeto de decidir nuestro comportamiento en el mundo. Se trataría, por tanto, de un conocimiento sin verdad.



Sin embargo, esa concepción no podía satisfacer a los científicos ni tampoco a todos los que consideraban la ciencia una forma muy excelente de conocimiento. Si la ciencia no aporta verdad, entonces, ¿cómo podemos atribuirle una superioridad respecto al simple sentido común, a los discursos imaginarios o arbitrarios y a otras formas no científicas de aproximarse a la realidad? La respuesta que encontramos fue la siguiente: la ciencia es un conocimiento objetivo. De esta manera, la objetividad se nos ofreció como sustituto de la verdad para salvar la dignidad de la ciencia. Pero ¿cómo hay que entender la objetividad?

Las diferentes respuestas dadas a ese interrogante podrían sintetizarse en dos sentidos fundamentales de la objetividad: el «fuerte» y el «débil». Según el sentido fuerte, consideraremos objetiva una propiedad si se encuentra realmente en el objeto que se investiga (podemos pensar que la longitud de un cuerpo se halla en el propio cuerpo y nosotros podemos medirla); en consonancia, tendremos que considerar objetivo el discurso que es capaz de describir dichas características del objeto. En su sentido débil, la objetividad es la propiedad de un discurso cuya validez no depende del sujeto particular que lo enuncia, sino de una cierta totalidad de sujetos; en pocas palabras, corresponde a la intersubjetividad sin referencia a objetos (en este sentido, la longitud objetiva de un cuerpo dependerá del acuerdo entre las diferentes mediciones realizadas por diferentes sujetos). Después de las crisis mencionadas, es obvio que la objetividad en sentido fuerte iba a ser considerada un fin inalcanzable, mientras que se afinaron los análisis de las condiciones que pueden brindar al discurso científico la objetividad en sentido débil.

ISTVAN BANYAI

Hay, sin embargo, un problema: un conocimiento es, en cuanto tal, el contenido de un acto de conocer. Son actos de conocer la sensación, la percepción, la reflexión, la introspección, el juicio, etcétera. Estos son llevados a cabo por un sujeto individual, y no resulta nada claro cómo pudieran convertirse en algo compartido por una pluralidad de sujetos. Ello sería imposible si este compartir requiriese que un sujeto percibiese la percepción, recordase los recuerdos y concibiese los conceptos de otro sujeto (que uno tuviese que echar una ojeada al interior de la mente de los demás). En realidad, para cualquier noción, no es la manera de aprenderla o de concebirla, sino la manera de usarla lo que nos permite compartirla, es decir, considerarla intersubjetiva: el acuerdo en el uso de la noción resulta suficiente para garantizarle una objetividad en sentido débil. Esta condición vale para todo tipo de noción, desde las más simples y comunes (color rojo) hasta las más abstractas (logaritmo). Para saber si otra persona maneja la misma noción que nosotros, no podemos entrar en su cabeza, sino invitarla a realizar ciertas operaciones que impliquen tal noción. Si constatamos que la usa igual que nosotros, decimos —impropiamente— que esta persona tiene la misma noción que nosotros.

Con todo, el sentido fuerte de la objetividad no ha sido totalmente eliminado de la concepción actual de la ciencia. Todos admitimos que cada ciencia se ocupa, no de la realidad en cuanto tal, sino solo de sus objetos específicos. Y, cuando se trata de precisar cuáles son los objetos propios de una ciencia, pensamos en ciertas cosas particulares (las plantas para la botánica o los animales para la zoología). Sin embargo, una misma cosa puede ser objeto de diferentes ciencias: una pieza arqueológica puede ser objeto de la física (cuando determinamos su peso y masa), de la química (cuando intentamos atribuirle una edad mediante métodos como el del carbono 14 o cuando analizamos su composición), de la historia (cuando la consideramos como documentación de eventos pasados) o de la economía (cuando le atribuimos un valor de mercado para venderla o asegurarla) y así sucesivamente.

Cada punto de vista opera un recorte en la cosa, y cada ciencia se ocupa de este recorte como su objeto. Por tanto, una misma cosa encierra en sí una multitud potencialmente indefinida de objetos. Esta noción de punto de vista parece introducir un factor de subjetividad en la noción misma de objeto. Pero no es así: hablando de manera menos intuitiva, diríamos que cada punto de vista consiste en considerar solamente unos poco atributos de una cosa e ignorar todos los demás. Si se trata de un discurso científico, estos atributos se traducen en los predicados básicos específicos de cierta ciencia, que constituyen la parte fundamental de su lenguaje técnico. Por consiguiente, cada ciencia se refiere solo a sus objetos específicos y no a la realidad en general.

Para cualquier noción, no es la manera de aprenderla o de concebirla, sino la manera de usarla lo que nos permite compartirla

Nos queda por precisar en qué consiste este *referirse*. Toda ciencia empírica se basa en sus datos, es decir, en proposiciones que se consideran inmediatamente verdaderas en el seno de la misma. Esto es posible porque dentro de la comunidad científica especializada en dicha ciencia se admiten ciertas operaciones estandarizadas para determinar los datos. En particular, estas sirven para decidir si una proposición que contenga únicamente predicados básicos es verdadera o falsa. Por tanto, estas operaciones constituyen al mismo tiempo criterios de verdad y criterios de referencia. Aplicadas a las cosas, permiten recortar en ellas los objetos específicos de una ciencia dada y, con ello, captar los referentes de su discurso. Como dichas operaciones se hallan vinculadas a los predicados básicos, determinan el significado operacional de los mismos y permiten establecer el valor de verdad de las proposiciones que los contienen.

Podemos, finalmente, extraer algunas consecuencias que afectan al concepto de objetividad científica. Cuando dos disciplinas científicas utilizan criterios operacionales diferentes para determinar sus términos técnicos, se refieren a objetos diferentes, aunque los términos sean verbalmente iguales. Así, la mecánica clásica y la mecánica cuántica utilizan criterios operacionales muy distintos para determinar el valor de sus magnitudes y, por tanto, se refieren a objetos distintos, aunque los nombren con la misma palabra. Esta es la razón por la cual no es justo decir que la mecánica clásica se ha revelado finalmente falsa. Habría que decir, más bien, que se reveló incapaz de tratar objetos diferentes de los que sus criterios de referencia permitían alcanzar. Las dos mecánicas resultan verdaderas, cada una en relación a sus objetos propios. ¿Podemos decir lo mismo de la mecánica relativista? La distancia lineal se mide en mecánica clásica con la operación básica de trasladar una regla a lo largo de un segmento; en la relatividad, las distancias se miden mediante transmisiones de señales luminosas. Se trata, por tanto, de operaciones tan diferentes que uno tiene que esperar que otras muchas cosas cambien también, como, de hecho, sucede. El atributo objetivo *distancia* será, pues, distinto en las diferentes mecánicas. A pesar de la coincidencia verbal, refiere en cada una de ellas a diferentes aspectos de la realidad.

Lo interesante es que son las mismas operaciones las que sirven para alcanzar el acuerdo intersubjetivo y para realizar la referencia a los objetos. Por consiguiente, las dos formas de objetividad, fuerte y débil, coinciden. Además, una vez se ha entendido que la verdad de un discurso siempre es relativa a los referentes del mismo y no a una supuesta realidad en general, puede recuperarse plenamente la noción de verdad en ciencia. La verdad no resulta eliminada en favor de la objetividad, sino que a través de este concepto puede ser precisada y defendida.

PARA SABER MÁS

Objectivity. Nicholas Rescher. University of Notre Dame Press, 1997.

Conocimiento objetivo. (5.ª edición). Karl Popper. Tecnos, 2007.

Scientific objectivity and its contexts. Evandro Agazzi, Springer, 2014.

Science between truth and ethical responsibility. Evandro Agazzi in the contemporary scientific and philosophical debate. Dirigido por Mario Alai, Marco Buzzoni y Gino Tarozzi. Springer, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La fiabilidad de la ciencia. Evandro Agazzi, Mariano Artigas y Gerard Radnitzky en *IyC*, noviembre de 1986.

Realismo científico. ¿Sigue el debate? Antonio Diéguez en *IyC*, marzo de 2012.

por Barbara J. King

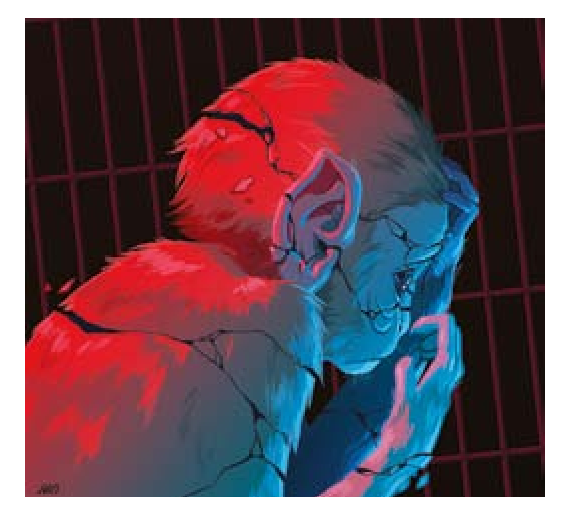
Barbara J. King, antropóloga biológica en el Colegio de William y Mary, ha estudiado babuinos en Kenia y grandes simios en cautividad.



Un sufrimiento innecesario

Deberían cesar los experimentos que separan a crías de mono de sus madres

Criadas en un aislamiento social total o parcial, aferradas desesperadamente a «madres» de alambre o trapo, las crías de mono rhesus sujetas a los experimentos de privación materna que el psicólogo estadounidense Harry F. Harlow realizó en los años cincuenta del siglo xx se mutilaban, se balanceaban obsesivamente y mostraban otros síntomas de depresión y ansiedad profundas. En las clases de psicología, antropología y comportamiento animal se sigue hablando hoy en día de las investigaciones de Harlow, basadas en el principio de que los modelos animales podían iluminar aspectos del cuidado maternal y de la depresión en humanos. Sin embargo, este profundo sufrimiento de los primates no pertenece solo al recuerdo histórico. Aún hoy se separa a la fuerza a las crías de mono rhesus de sus madres y se las somete a tales formas de estrés que se las deja traumatizadas física y emocionalmente.



En el Laboratorio de Etología Comparada del Instituto Nacional de Salud Infantil y Desarrollo Humano Eunice Kennedy Shriver, en Poolesville (Maryland), dirigido por Stephen Suomi, a menudo se separa a las crías de mono de su madre solo unas horas después de nacer. Durante 22 horas al día (las 24 los fines de semana) no tienen compañeros de jaula con los que interaccionar. Como sé por mi trabajo en Kenia con crías salvajes de babuino (monos con una organización social parecida a la del rhesus), semejante régimen causa terribles distorsiones en los animales. En la vida silvestre, esas crías viven en el seguro centro de un grupo matrilineal, un grupo de hembras emparentadas. Juegan con sus iguales y exploran su mundo, pero vuelven a todo correr a la calidez y protección que les da el ser más importante en su vida, la madre.

En el Laboratorio de Etología Comparada, por el contrario, las crías sin madre padecen acciones estresantes (como que se las asuste deliberadamente mientras están solas) en experimentos diseñados para evaluar su reactividad y entender mejor los factores de riesgo que actúan durante el desarrollo y conducen a los humanos a sufrir enfermedades mentales. Los artículos científicos que se derivan de estos estudios nos hacen saber que las crías sufren consecuencias biológicas y comportamentales que perdurarán toda su vida, entre ellas mala salud, mayor estrés, incompetencia materna y agresividad anormal.

Como testigo de la lucha de dos queridos miembros de mi familia contra la enfermedad mental, sé bien lo importante que es la investigación en este campo. Sin embargo, las evaluaciones sistemáticas nos dicen que los modelos animales no son extrapolables a la salud mental humana. Para tratar este tipo de trastornos en humanos hay que prestar atención a los factores estresantes reales que experimentamos en nuestra vida, en vez de a los artificiales que les infligimos a los rhesus. Estudios basados en estrategias distintas, así la obtención de neuroimágenes y el seguimiento a largo plazo de la vida cotidiana de los pacientes, están logrando avances notables en ese empeño.

No es una defensa adecuada señalar que ese tipo de investigación satisface las directrices de atención a los animales de las universidades y del Gobierno federal de Estados Unidos. El listón para obtener el permiso de efectuar experimentos invasivos con primates (y otros animales) está bastante bajo. Como observaba Lawrence Arthur Hansen hace dos años en *Journal of Medical Ethics*, es desproporcionada la presencia en los comités supervisores de los mismos que se ganan la vida prosiguiendo esos experimentos: quienes investigan con animales y los veterinarios que trabajan para algún organismo o instituto.

Un primer paso para enfrentarse a ese sesgo sería admitir en los comités a partes conocedoras pero que no se beneficien directamente del dinero que se conceda a los proyectos evaluados (científicos sociales y expertos en bioética, por ejemplo). Como observa Hansen, no menos necesario sería un cambio en la cultura institucional que garantizase que los comités consideran de forma más directa las cuestiones relativas a beneficios y perjuicios.

Me impresiona el paralelismo con las investigaciones biomédicas con chimpancés que se hacían en los Institutos Nacionales de la Salud de EE.UU.: una evaluación independiente, del Instituto de Medicina, juzgó en 2011 que eran «innecesarias». Una y otra vez, comités de atención a los animales y juntas de evaluación habían aprobado estudios biomédicos con chimpancés. La supervisión no protegía éticamente en el pasado a esos chimpancés de laboratorio, y tampoco lo hace ahora con los monos de laboratorio.

No es necesario oponerse a *todas* las investigaciones con primates no humanos para ver lo desfasados y desencaminados que son *algunos* estudios biomédicos. Es hora de acabar con la cruel herencia de Harlow.

JULIAN CALLOS



PREHISTORIA

Modelos mate de la trans

Los mecanismos que impulsaron la propagación de la agricultura en Europa han sido debatidos durante décadas por arqueólogos y genetistas. Un nuevo enfoque basado en el empleo de herramientas matemáticas está permitiendo entender mejor algunos aspectos del proceso

Joaquim Fort



VIAJE AL PASADO: Los modelos matemáticos y las simulaciones por ordenador están permitiendo reconstruir el proceso por el que la agricultura llegó a Europa desde Oriente Próximo. La imagen muestra el yacimiento turco de Çatalhöyük, de unos 7500 años de antigüedad. Por aquella época la labranza ya se practicaba en Anatolia, pero aún no había alcanzado el norte de nuestro continente.

máticos
ición neolítica

Joaquim Fort es catedrático de física de la Universidad de Gerona. Sus investigaciones se centran en el desarrollo de modelos matemáticos aplicables al estudio de la prehistoria, la lingüística y los sistemas biológicos. En 2014 recibió el premio ICREA de Humanidades.



La transición al Neolítico supuso uno de los mayores cambios en la historia de la humanidad. Puede definirse como la aparición de la agricultura; es decir, la sustitución de una economía dependiente de la caza y la recolección por otra basada en la ganadería y el cultivo. Por supuesto, semejante revolución no tuvo lugar al mismo tiempo en todos los puntos del globo. Hoy sabemos que, hace unos 11.000 años, la agricultura ya se practicaba en Oriente Próximo, pero no aún en Europa. ¿Cómo se difundieron las nuevas técnicas de producción de alimentos por nuestro continente?

La pregunta ha ocupado a investigadores de diversas disciplinas desde hace años. En 1971, el arqueólogo Albert Ammerman y el genetista Luigi Luca Cavalli-Sforza, por entonces ambos en Stanford, hallaron que la transición neolítica se propagó por Europa a una velocidad aproximada de un kilómetro al año. Los autores llegaron a esa conclusión tras analizar las dataciones neolíticas más antiguas de 53 yacimientos arqueológicos. Su trabajo demostró que, desde Oriente Próximo, la nueva economía se expandió por el continente europeo y llegó a lo que hoy es Dinamarca hace unos 6000 años.

El resultado de Ammerman y Cavalli-Sforza se ha visto confirmado por estudios posteriores. En 2005, junto con Ammerman y Ron Pinhasi, de la Universidad de Roehampton, llegamos a la misma conclusión tras analizar las dataciones de 735 yacimientos arqueológicos. Marc Vander Linden, de la Universidad de Leicester, ha recopilado datos de 919 yacimientos que también confirman esa velocidad. Pero ¿qué nos dice esa circunstancia sobre nuestro pasado? ¿Por qué la velocidad de expansión de la agricultura fue de un kilómetro al año y no, por ejemplo, de 10 o de 0,1 kilómetros al año?

La transición neolítica en Europa ha suscitado otras preguntas de interés. Por ejemplo, aún no sabemos a ciencia cierta por qué el avance de la agricultura procedió algo más rápido a lo largo del Mediterráneo que hacia el norte del continente. Otras cuestiones atañen a la evolución de la diversidad cultural durante el proceso y a los mecanismos que impulsaron la difusión de aquellos conocimientos. En particular, hace décadas que arqueólogos y genetistas se preguntan si la labranza llegó a Europa porque así lo hicieron las poblaciones de agricultores y ganaderos —como sucedió en Norteamérica en el siglo XIX— o si se debió a que los cazadores-recolectores europeos aprendieron a imitar el comportamiento de sus vecinos. En otras palabras, ¿tuvo lugar una difusión de ideas, de poblaciones, o de ambas?

A continuación veremos que una rica fuente de información al respecto procede de una serie de herramientas tal vez insospechadas: los modelos matemáticos y las simulaciones por ordenador. Durante los últimos años, varios trabajos han demostrado que es posible abordar fenómenos históricos complejos con técnicas y conceptos habitualmente asociados a la física y la estadística. Tales métodos han permitido poner a prueba la verosimilitud de distintas hipótesis históricas y, en numerosos casos, han proporcionado respuestas que se hallan en acuerdo con los hallazgos arqueológicos. Las mismas técnicas han revelado, además, que en la evolución histórica de las sociedades humanas han tenido lugar algunos fenómenos generales observados también en otras disciplinas, como la genética de poblaciones, la lingüística y la antropología.

MATEMÁTICAS E HISTORIA

El primer modelo matemático que permitió explicar la velocidad de propagación de la transición neolítica en Europa fue presentado por los propios Ammerman y Cavalli-Sforza en 1973. Aquel

EN SÍNTESIS

La transición del Neolítico supuso el abandono de la caza y la recolección por el cultivo y la ganadería. Los datos arqueológicos indican que, desde Oriente Próximo, aquel cambio se propagó por Europa a una velocidad de un kilómetro al año.

Los expertos debaten desde hace años si la agricultura llegó a Europa junto con pueblos originarios de Oriente Próximo o si, por el contrario, los cazadores-recolectores europeos aprendieron a imitar el comportamiento de sus vecinos.

Los modelos matemáticos han permitido entender varios aspectos del fenómeno; entre ellos, su velocidad de propagación, la evolución de la diversidad cultural durante del proceso y la importancia relativa de la difusión de poblaciones y de ideas.

PÁGINAS ANTERIORES: THINKSTOCKPHOTOS/MURATART

año, los investigadores predijeron que, al alejarnos del lugar de origen de la agricultura (Oriente Próximo, en el caso europeo), los genes de las poblaciones pasadas —y quizás incluso de las actuales— serían cada vez más distintos. Dicho fenómeno recibe el nombre de «clina genética».

Una manera simplificada de entenderlo es la siguiente. Si suponemos que, durante el avance de la agricultura, nacieron individuos a partir de uniones mixtas entre agricultores y cazadores-recolectores (o de uniones entre los primeros y descendientes de los segundos convertidos en agricultores), la composición genética final debería incluir genes de ambas poblaciones. Por tanto, a medida que nos alejemos de Oriente Próximo, tendríamos que encontrar menos genes de las poblaciones originarias de aquella zona, ya que estos se habrían ido «diluyendo» como consecuencia de las uniones mixtas.

La clina predicha por Ammerman y Cavalli-Sforza fue confirmada de manera espectacular cinco años después. En 1978, Paolo Menozzi, de la Universidad de Parma, Alberto Piazza, de la de Turín, y Cavalli-Sforza obtuvieron mapas de la frecuencia con que aparecían numerosos genes en las poblaciones europeas actuales. A partir de esos datos, los investigadores observaron que dichas frecuencias génicas variaban de manera gradual con la distancia a Oriente Próximo. Pero el trabajo de Cavalli-Sforza y Ammerman fue más allá de la genética de poblaciones y la arqueología. Los investigadores llevaron a cabo simulaciones que predecían una clina genética como la observada. Con ello, marcaron un hito en el desarrollo de modelos matemáticos para explicar la prehistoria e historia humanas.

¿Cómo se les ocurrió a Ammerman y Cavalli-Sforza emplear un modelo matemático para describir un fenómeno histórico? Cavalli-Sforza había trabajado varios años en el laboratorio de Sir Ronald A. Fisher, eminente estadístico y genetista de la Universidad de Cambridge. Allí leyó un artículo en el que Fisher proponía que un gen (o, de manera equivalente, una población) podía expandir su ámbito geográfico propagándose como una «ola de avance». Inspirado por las ideas de Fisher, Cavalli-Sforza decidió aplicar una versión de su modelo a la transición del Neolítico.

Su idea se basaba en considerar una población de agricultores que se reproducen y cuyos hijos emigran hacia otros lugares. Ello da lugar a una población agrícola que avanza en el espacio de manera similar a como lo hace una ola en el mar. Por supuesto, dicha «ola» no se encuentra formada por moléculas de agua, sino por individuos humanos. Otra diferencia reside en que la onda correspondiente no adopta forma de montículo, sino de escalón: tras partir de cero, la densidad de población agrícola aumenta, llega a un máximo y permanece en ese nivel en toda la región situada por detrás de la línea de avance.

EL NEOLÍTICO EN UN ORDENADOR

Aunque el modelo matemático de Ammerman y Cavalli-Sforza suele formularse con ecuaciones diferenciales, existen modelos numéricos equivalentes en los que estas no son necesarias. Imaginemos una población que, a partir de un origen común, va ocupando los nodos de un retículo bidimensional (podemos pensar en esos nodos como en asentamientos humanos). Los individuos se reproducen y algunos de sus hijos se desplazan a un nodo vecino. A su vez, estos engendran descendientes, parte de los cuales emigran, etcétera. En el caso más sencillo, podemos suponer que la descendencia que marcha se reparte de manera uniforme entre los cuatro nodos más próximos de una red cuadrada. Sin más que un ordenador personal, podremos calcular, para cada generación, el número de individuos presentes en cada nodo de la red.

Al colocar nuestro retículo sobre el mapa de Europa y situar el origen del proceso en Oriente Próximo, obtendremos un modelo homogéneo en el que la línea de avance procede en círculos aproximadamente concéntricos desde dicha región. Resulta sencillo concebir modelos más generales, en los que no todos los hijos migran a una misma distancia de su lugar de origen, sino que se distribuyen según un abanico de distancias, cada una determinada por una probabilidad.

El gran mérito de Ammerman y Cavalli-Sforza fue que no ajustaron a posteriori ningún parámetro, sino que se basaron en datos reales de poblaciones agrícolas preindustriales y los usaron para deducir todos los parámetros del modelo de Fisher: la distancia entre los lugares de nacimiento de padres e hijos, la diferencia media de edad entre unos y otros, y la tasa neta de reproducción (básicamente, la tasa de fecundidad corregida por la mortalidad infantil). De igual modo, y sin necesidad de ajustar ningún parámetro, los modelos numéricos sencillos que acabamos de describir predicen que el Neolítico se propagó por Europa a una velocidad cercana a un kilómetro al año, un resultado acorde con la velocidad media inferida a partir de los datos arqueológicos.

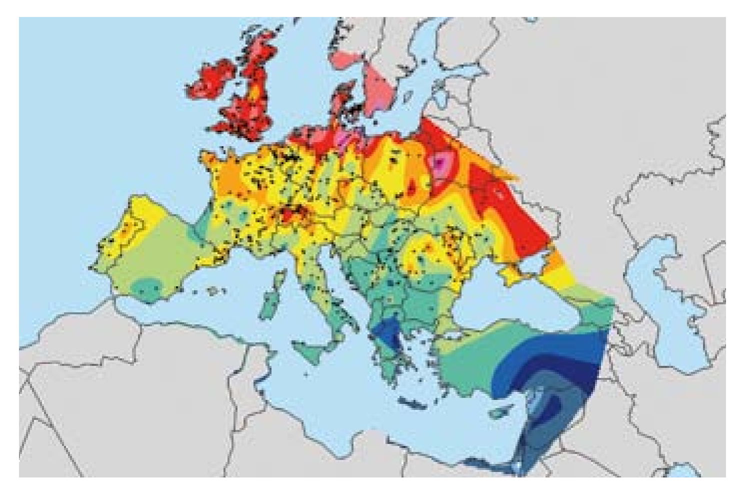
Los modelos matemáticos han logrado predecir la pérdida de diversidad cultural que tuvo lugar durante el avance del Neolítico. Un fenómeno similar se ha observado en lingüística y en genética de poblaciones

Sin embargo, dichos datos también revelan que la velocidad de la ola de avance no fue idéntica en todas las direcciones, sino algo mayor a lo largo de la costa del Mediterráneo y menor hacia el norte. ¿Pueden modelizarse estas diferencias?

No hay duda de que las primeras poblaciones neolíticas viajaban también por mar, ya que sabemos que llegaron a islas como Chipre, situada a unos cien kilómetros del continente. Para dar cuenta de tales desplazamientos, resulta necesario formular modelos en los que a las poblaciones se les permita recorrer una cierta distancia a través del mar. En 2012, junto con Toni Pujol, de la Universidad de Gerona, y Vander Linden hallamos que el mejor acuerdo con los datos arqueológicos (es decir, la mínima diferencia media entre la datación de cada yacimiento y el momento de llegada predicho por los modelos) se obtenía al suponer que las primeras poblaciones neolíticas eran capaces de navegar distancias de hasta 150 kilómetros.

Yacimientos arqueológicos y simulaciones numéricas

Hace unos 11.000 años la agricultura ya se practicaba en Oriente Próximo, pero no en Europa. Los datos arqueológicos (*arriba*) indican que las nuevas técnicas de producción de alimentos se difundieron por Europa a un ritmo aproximado de un kilómetro al año. ¿A qué se debió esta velocidad? Los modelos matemáticos (*abajo*) pueden arrojar luz sobre esta cuestión.



Antigüedad (años)

3672-4000	7001-7500
4001-4500	7501-8000
4501-5000	8001-8500
5001-5500	8501-9000
5501-6000	9001-9500
6001-6500	9501-10.000
6501-7000	10.001-10.500

• Yacimientos

Datos arqueológicos

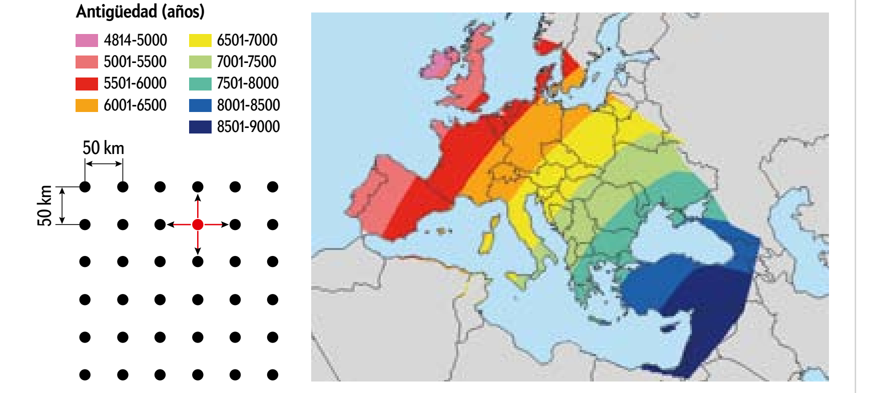
Mapa del proceso de difusión de la agricultura en Europa obtenido a partir de las dataciones arqueológicas de 919 yacimientos. Los colores indican la fecha aproximada de aparición de las primeras comunidades agrícolas en cada lugar.

La difusión de la agricultura puede modelizarse como una ola de avance a lo largo de una red de asentamientos. Con cada generación de agricultores, una fracción de los descendientes emigra y se desplaza a los asentamientos vecinos. A partir de datos reales de poblaciones agrícolas preindustriales, las simulaciones por ordenador han conseguido reproducir la velocidad inferida a partir de los yacimientos arqueológicos. A continuación se destacan dos modelos sencillos, uno homogéneo y otro que tiene en cuenta los accidentes geográficos.

Modelo homogéneo

La primera opción consiste en suponer que, para cada generación de agricultores, una fracción de los descendientes se distribuye con la misma probabilidad entre los cuatro nodos vecinos de una red cuadrada (*esquema*). La distancia entre asentamientos (50 kilómetros) corresponde a la media observada para poblaciones agrícolas preindustriales.

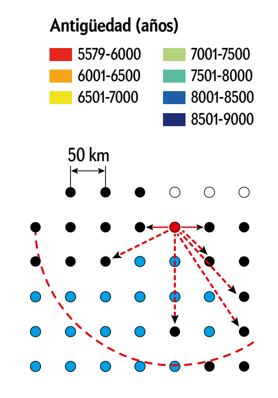
Estas simulaciones predicen una ola de avance que se propaga en círculos aproximadamente concéntricos desde Oriente Próximo a una velocidad cercana a un kilómetro al año (*mapa*), un resultado similar al promedio de las dataciones arqueológicas.

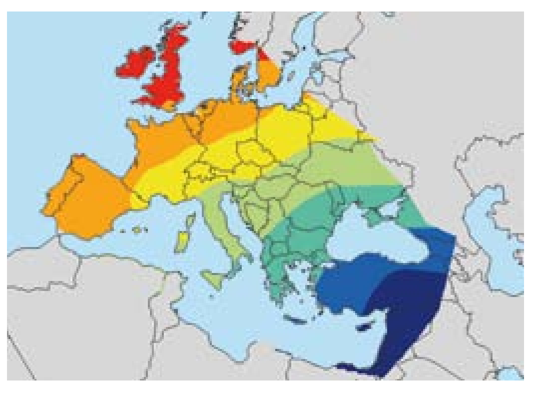


Modelo no homogéneo

Otra posibilidad de simulación, más refinada, se basa en incluir, además de los viajes por tierra (*nodos negros*), los desplazamientos por mar (*nodos azules*) hasta cierta distancia (*línea circular discontinua*), así como las limitaciones que impone la presencia de montañas de gran altura (*nodos blancos*), donde no es posible practicar la agricultura.

Al considerar varios casos, se comprueba que el frente de avance que mejor se ajusta a las observaciones arqueológicas corresponde a viajes por mar de hasta 150 kilómetros (*mapa*).





FUENTE: «MODELLING THE NEOLITHIC TRANSITION IN THE NEAR EAST AND EUROPE», JOAQUIM FORT, TONI PUJOL Y MARC VANDER LINDEN EN *AMERICAN ANTIQUITY*, VOL. 77, N.º 2, ABRIL DE 2012 (*mapas y esquemas*); MARC VANDER LINDEN, UNIVERSIDAD DE LEICESTER (*datos arqueológicos*)

Hasta ahora nos hemos centrado en las simulaciones por ordenador. En lo que respecta a los modelos analíticos, en 1999, junto con Vicenç Méndez, por entonces en la Universidad Internacional de Cataluña, generalizamos la ecuación diferencial de Fisher para incluir el hecho de que los hijos deben convivir con los padres durante cierto tiempo antes de poder emigrar (dicho aspecto no estaba incluido en el modelo original de Fisher). Esta y otras modificaciones arrojan una velocidad media más acorde con los datos arqueológicos —y con las simulaciones— que la que predice el modelo de Fisher.

En general, los modelos analíticos y las simulaciones conducen a resultados muy similares en lo referente a la velocidad de la ola de avance. Sin embargo, las simulaciones cuentan con la ventaja de que permiten trabajar con geografías no homogéneas (aquellas que incluyen los accidentes del terreno, como el mar o cadenas montañosas), mientras que los modelos analíticos no se prestan a incluir tantos detalles.

En ciertos casos, sin embargo, el uso de ecuaciones ayuda a comprender mejor algunos fenómenos sin necesidad de llevar a cabo simulaciones excesivamente complejas. Por ejemplo, los modelos analíticos han permitido entender la lentitud del avance del Neolítico hacia el norte de Europa sin necesidad de ajustar ningún parámetro. Al principio pensamos que dicha lentitud tal vez se debiese al tiempo necesario para que los cultivos se adaptaran al frío clima del norte europeo. Sin embargo, entre los años 2000 y 2008, Stephen Shennan, de la Escuela Universitaria de Londres, y sus colaboradores examinaron con detalle las especies cultivadas en la ola de avance y concluyeron que el clima probablemente no hubiese ejercido ningún efecto determinante. Al parecer, los agricultores neolíticos se centraron en las plantas que mejor se adaptaban a cada clima y simplemente olvidaron las otras. Entonces, ¿qué frenó la propagación del Neolítico en Europa septentrional?

Según los datos disponibles en la actualidad, la densidad de poblaciones mesolíticas en el norte de Europa era mayor que en el sur. En 2011, junto con Neus Isern, de la Universidad de Gerona, desarrollamos un modelo analítico que suponía que, cuanto más espacio tuviesen a su disposición las comunidades neolíticas —es decir, cuanto menor fuese la densidad de población mesolítica—, más elevada sería su probabilidad de reproducción y de dispersión. (El mismo efecto en la tasa de reproducción se ha observado experimentalmente en microorganismos.) Como resultado, y sin necesidad de ajustar ningún parámetro, nuestro modelo predecía con acierto el frenado de la ola de avance neolítica en el norte de Europa. Aunque por supuesto hay otras explicaciones del fenómeno, nuestro análisis supuso un primer paso cuyo principal mérito residía en demostrar la posibilidad de modelizar matemáticamente procesos prehistóricos complejos.

EVOLUCIÓN CULTURAL

En 2008, el arqueólogo James Conolly, de la Universidad de Trent, y sus colaboradores efectuaron un descubrimiento de gran interés. Observaron una disminución drástica de la diversidad de especies cultivadas a lo largo de la ola de avance neolítica desde el sudeste europeo (Grecia y los Balcanes) hasta Europa central (Alemania, República Checa, etcétera). Por ejemplo, según se desprende de más de la mitad de los yacimientos de Europa central, en ellos se cultivaban solo dos especies de cereales. En cambio, unos 1500 años antes —cuando la agricultura aún no había llegado a Centroeuropa— en la mayor parte del sudeste europeo se plantaban al menos cuatro. ¿Por qué se perdieron aquellos conocimientos?

En principio, cabría pensar que algunos cultivos mediterráneos se abandonaron por ser menos viables en el clima frío y húmedo del norte de Europa. Dicho factor sin duda influyó en la pérdida de algunas especies, como las lentejas; pero otras, como los guisantes, resultan igualmente productivas en ambas regiones. Sin embargo, al considerar solo aquellos cultivos que rinden igual de bien en las dos zonas, el grupo de Conolly siguió observando una disminución considerable de la diversidad agrícola a medida que la ola neolítica avanzaba hacia el norte. Parece evidente, pues, que dicha pérdida no se debió al clima.

En 2011, junto con Joaquim Pérez Losada, de la Universidad de Gerona, desarrollamos un nuevo tipo de simulaciones sobre una red de puntos que, además de calcular la población en los distintos nodos, incorporaban también la cultura de cada yacimiento. Esta quedaba definida como una lista de dígitos que indicaban la presencia (1) o ausencia (0) de cada especie de cultivo agrícola. Partimos de una serie de yacimientos del sudeste europeo en la que los diferentes cultivos tenían asignada una probabilidad dada por las observaciones arqueológicas. Después, dejamos que el ordenador simulara la propagación de la ola neolítica. Fue una grata sorpresa comprobar cómo, sin ajustar ningún parámetro, nuestro modelo señalaba una disminución de la diversidad cultural hasta llegar a un valor similar al deducido por los arqueólogos.

OTRAS APLICACIONES

Del Neolítico europeo a las lenguas celtas

Los modelos de ola de avance no solo se han aplicado a la transición del Neolítico en Europa, sino también a otras poblaciones y fenómenos históricos. En 2004, Toni Pujol, Luigi Luca Cavalli-Sforza y el autor de este artículo aplicaron dichos modelos a la expansión de cazadores-recolectores que se produjo hacia el norte de Europa después de la última glaciación, hace entre 14.000 y 12.000 años. Tres años después, Marcus J. Hamilton, de la Universidad de Nuevo México y el Instituto Santa Fe, y Briggs Buchanan, de la Universidad de la Columbia Británica, usaron su modelo para describir la ocupación paleoindia inicial de América, ocurrida hace más de 12.000 años. El grupo de Anvar Shukurov, de la Universidad de Newcastle, modelizó en 2010 las dos olas de avance neolíticas que hace milenios llegaron a la India (una procedente de Oriente Próximo y la otra de Extremo Oriente). El autor de este artículo ha empleado los mismos métodos para estudiar el frente neolítico que se propagó por Oceanía hace entre 4000 y 1000 años.

Por otro lado, el grupo del físico Morrel H. Cohen, de las universidades de Rutgers y Princeton, ha usado los modelos de ola de avance para estudiar las fronteras culturales y lingüísticas debidas a la propagación del neolítico en Europa, la India y Sudáfrica. Con algunas modificaciones, las mismas técnicas han permitido analizar otros fenómenos sociales. Por ejemplo, Anne Kandler y James Steele, de la Escuela Universitaria de Londres, han desarrollado modelos que describen la sustitución de las lenguas célticas de Escocia y Gales por el inglés durante el siglo pasado.

El efecto observado obedece a un fenómeno más general conocido con el nombre de «deriva» (*drift*). En nuestro caso, puede definirse como la pérdida de rasgos culturales en poblaciones pequeñas. En términos cualitativos no resulta difícil de entender. Consideremos, por ejemplo, una región del sur de Europa con cinco asentamientos; si los descendientes de los agricultores de uno de ellos emigran hacia el norte, los cultivos que solo estaban presentes en los otros cuatro pueden perderse.

La deriva no solo reviste importancia en arqueología, sino también en otras disciplinas. En genética, Cavalli-Sforza y sus colaboradores hallaron en 2005 que el mismo fenómeno podía explicar la merma de la diversidad genética observada en las poblaciones humanas a medida que aumenta su distancia con respecto a África oriental (la región de origen de los humanos anatómicamente modernos). Cavalli-Sforza también ha demostrado que la deriva puede dar cuenta de la disminución de la diversidad genética en las zonas montañosas, donde las poblaciones tienen menos habitantes. En lingüística, Quentin Atkinson, de la Universidad de Auckland, en Nueva Zelanda, propuso en 2011 que dicho efecto sería responsable de la disminución de la diversidad fonética a medida que nos alejamos de África. Y, en antropología, se ha sugerido que, entre otros aspectos de interés, la deriva causaría la pérdida de técnicas que suele tener lugar en las sociedades aisladas. Como vemos, se trata de un fenómeno de gran importancia para entender mejor las sociedades humanas desde múltiples puntos de vista.

Por último, los modelos matemáticos han permitido abordar una pregunta que desde hace tiempo viene suscitando acalorados debates entre arqueólogos y genetistas: ¿qué mecanismo impulsó la transición neolítica? Como mencionábamos al principio, la llegada del Neolítico consistió en el abandono de una economía basada en la caza y la recolección por otra agrícola y ganadera. Sin embargo, cabe cuestionarse si aquel cambio se limitó al reemplazo de una economía por otra o si, además, hubo también un relevo de poblaciones. En un trabajo reciente, el autor de este artículo ha desarrollado un modelo que permite estimar, a partir de datos exclusivamente arqueológicos, en qué medida la propagación del Neolítico en Europa fue démica (es decir, causada por el movimiento de poblaciones) y en qué medida cultural (debida al aprendizaje de las técnicas agrícolas por parte de los cazadores-recolectores).

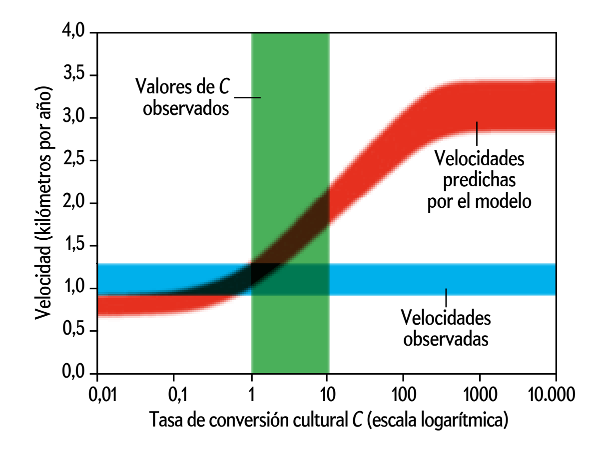
La idea parte de una suposición muy simple: si solo hay dispersión de poblaciones agrícolas, la ola neolítica no se propagará tan rápido como si, además, algunos cazadores-recolectores autóctonos se convierten en agricultores. Para estudiar este efecto puede definirse una «tasa de conversión cultural», *C*, la cual corresponde al número de cazadores-recolectores que se convierten en agricultores por cada agricultor que llega a

MECANISMOS DE PROPAGACIÓN

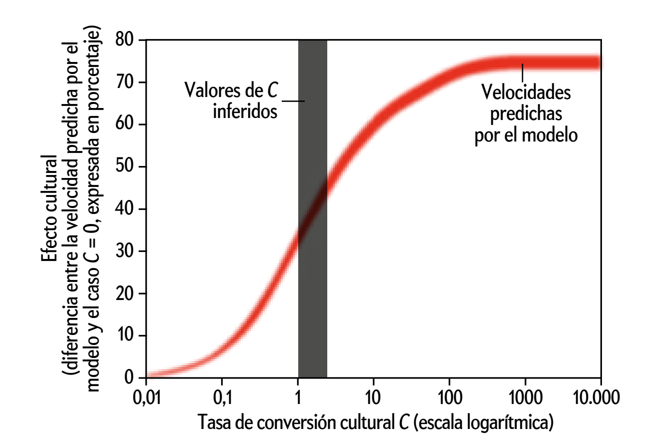
¿Difusión démica o cultural?

Existen dos teorías tradicionales sobre la propagación de la agricultura en Europa. Una defiende que el Neolítico avanzó debido a un movimiento de poblaciones (difusión démica); la otra sostiene que el mecanismo principal fue la transmisión de ideas (difusión cultural). Un modelo matemático desarrollado por el autor ha permitido por primera vez cuantificar el peso relativo de ambos factores.

En los modelos de propagación del frente neolítico puede incluirse una tasa de conversión cultural, *C*, la cual indica cuántos cazadores-recolectores se convierten en agricultores por cada agricultor que llega a su zona. Cuanto mayor sea dicha tasa, mayor será la velocidad de la ola de avance. Las observaciones etnográficas de las interacciones entre cazadores-recolectores y agricultores arrojan un intervalo de valores permitidos para *C*. Al cruzar esos datos con las predicciones del modelo y con la velocidad del frente neolítico inferida a partir de las dataciones arqueológicas, pueden estimarse los valores de *C* durante la propagación de la agricultura (*izquierda*). Estos implican que la difusión cultural habría contribuido en un 40 por ciento a la velocidad de la ola de avance (*derecha*).



Velocidad del frente y conversión cultural
La velocidad de avance predicha por el modelo (*rojo*) aumenta con el factor de conversión cultural, *C*. El abanico de velocidades que contempla el modelo intersecta en una región estrecha (*negro*) con la tasa de conversión cultural inferida a partir de las observaciones etnográficas (*verde*) y con la velocidad del frente deducida de los datos arqueológicos (*azul*).



Efecto cultural
Los valores de *C* inferidos de la gráfica anterior (*negro*) implican que el efecto de la difusión cultural en la velocidad del frente neolítico fue de entre un 32 y un 48 por ciento. Así pues, aunque la difusión démica habría tenido un peso mayor, ninguno de los dos fenómenos puede despreciarse.

GRÁFICAS ADAPTADAS DE: «SYNTHESIS BETWEEN DEMIC AND CULTURAL DIFFUSION IN THE NEOLITHIC TRANSITION IN EUROPE», JOAQUIM FORT EN PNAS, VOL. 109, N.º 46, NOVIEMBRE DE 2012

su región. A partir de ahí puede formularse una ecuación que expresa la velocidad de avance de la ola neolítica en función de la tasa de conversión cultural. Por otro lado, el intervalo de valores plausibles de esta tasa puede inferirse a partir de las observaciones etnográficas relativas a poblaciones de cazadores-recolectores y de agricultores.

Al calcular las velocidades de la ola neolítica en Europa con y sin conversión de cazadores-recolectores y comparar los resultados con los datos arqueológicos, se obtiene que la difusión cultural explicaría en torno a un 40 por ciento de la velocidad del frente de avance. El 60 por ciento restante se debería, por tanto, a la dispersión de poblaciones. Aunque solo se trata de un promedio a todo el ámbito continental, este resultado demuestra que ni la difusión démica ni la cultural pueden despreciarse.

HACIA UNA NUEVA CIENCIA

¿Tiene sentido emplear las matemáticas para describir la prehistoria? En lo tocante a algunos fenómenos, como el cálculo de la velocidad de la ola de avance neolítica, parece claro que sí. Sin embargo, la prehistoria y la historia no pueden repetirse. No podemos hacer experimentos para replicar la propagación del Neolítico bajo diferentes condiciones y comprobar si nuestro modelo predice correctamente el efecto de variar diferentes parámetros, como la tasa de reproducción y de dispersión humanas. Así pues, ¿podemos aspirar a comprobar los modelos matemáticos de la prehistoria?

Hay una ciencia que tal vez nos sirva de referente: la cosmología. La evolución del universo tampoco puede repetirse. Jamás lograremos replicar en un experimento la gran explosión que dio origen al cosmos y estudiar su desarrollo posterior. Con todo, hoy por hoy nadie duda de que la cosmología es una ciencia.

La razón fundamental se debe a que el modelo de la gran explosión hizo predicciones que no hacían otros modelos, como la existencia de la radiación cósmica de fondo, y a que dichas predicciones se comprobaron experimentalmente. En 1967, poco después del descubrimiento del fondo cósmico de microondas, el eminente cosmólogo Dennis Sciama escribió en *Scientific American* que aquel hallazgo le había causado una gran tristeza, pues refutaba cierto modelo cosmológico que él consideraba mucho más elegante que el de la gran explosión. Pero que, sin embargo, gracias a él la cosmología se había convertido por fin en una ciencia.

Cabe preguntarse si modelos matemáticos de la historia darán algún día ese paso. Si tomamos la cosmología como ejemplo, el reto consiste en hacer predicciones no triviales que puedan ponerse a prueba. Ya contamos con un ejemplo: la clina genética en Europa predicha en 1973 por Ammerman y Cavalli-Sforza, la cual fue observada pocos años después. (Si bien es cierto que, además de la ola de avance neolítica, en la formación de dicha clina pudieron haber influido otros factores.) En lo que respecta a las predicciones no hemos avanzado mucho, pero parece razonable pensar que este es el ejemplo que debemos seguir.

Aunque aquí nos hemos centrado en modelos matemáticos, vale la pena mencionar que algunos investigadores han propuesto que la transición al Neolítico podría explicar el origen de las lenguas indoeuropeas [*véase* «¿Cómo llegaron a Europa las lenguas indoeuropeas?», por Ruth Berger; Investigación y Ciencia, enero de 2011]. Hay grandes debates sobre esta posibilidad, pero no cabe duda de que la expansión de las lenguas constituye un fenómeno de gran importancia que merece ser estudiado mediante modelos. Sin embargo, el progreso en este ámbito se ve dificultado enormemente por el hecho de que solo disponemos de datos lingüísticos de poblaciones recientes, no prehistóricas. Esta falta de datos no solo obstaculiza la modelización de la evolución lingüística durante la prehistoria, sino también la de otros fenómenos, como el avance del Neolítico en continentes distintos del europeo. A pesar de todo, en el futuro dispondremos de más datos, que probablemente permitirán estudiar la propagación del Neolítico en varios continentes e incluso el porcentaje de difusión démica y cultural en cada caso. De hecho, ya han empezado a publicarse los primeros resultados para Asia, así como para las expansiones bantú y khoikhoi, en África.

Un aspecto clave de la transición neolítica fue que, con la llegada de la agricultura, se hizo posible almacenar comida durante largos períodos de tiempo. Se cree que este avance posibilitó muchos otros, como una mayor división del trabajo, un aumento en el ritmo de desarrollo tecnológico, el nacimiento de las ciudades y, con ello, el desarrollo de los sistemas de numeración y de la escritura. De hecho, los cazadores-recolectores suelen disponer de pocas palabras para designar números; por ejemplo, algunos solo emplean las palabras *uno*, *dos* y *muchos*. Así pues, parece que sin agricultura no tendríamos sistemas de numeración, aritmética, escritura ni, por tanto, ciencia cuantitativa. Desde esta perspectiva, la transición del Neolítico no habría sido un cambio de muchos en la historia humana, sino probablemente el cambio fundamental, el que dio forma a nuestra sociedad y a nuestros conocimientos. Estudiar el Neolítico es, de alguna forma, entendernos mejor a nosotros mismos.

Por último, vale mencionar que, si bien los modelos de la transición al Neolítico obedecen a una motivación puramente intelectual, también han dado lugar a aplicaciones totalmente inesperadas. Por ejemplo, el mismo tipo de modelos se ha empleado para describir la propagación de infecciones víricas en poblaciones de células. Y algunos de esos virus se han mostrado útiles a la hora de combatir tumores. El autor de este artículo nunca pensó que los modelos matemáticos del Neolítico pudieran aplicarse a entender y combatir el cáncer. Una demostración más de que la investigación puramente teórica es también una senda de progreso.

PARA SABER MÁS

The Neolithic transition and the genetics of populations in Europe. Albert A. Ammerman y Luigi Luca Cavalli-Sforza. Princeton University Press, 1984.

Quiénes somos. Luigi Luca Cavalli-Sforza. Crítica, 1994.

Palaeolithic populations and waves of advance. Joaquim Fort, Toni Pujol y Luigi Luca Cavalli-Sforza en *Cambridge Archaeological Journal*, vol. 14, n.º 1, págs. 53-61, abril de 2004.

Tracing the origin and spread of agriculture in Europe. Ron Pinhasi, Joaquim Fort y Albert A. Ammerman en *PLoS Biology*, vol. 3, n.º 12, págs. 2220-2228, diciembre de 2005. Disponible en **journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.0030410**

Modelling the Neolithic transition in the Near East and Europe. Joaquim Fort, Toni Pujol y Marc Vander Linden en *American Antiquity*, vol. 77, n.º 2, págs. 203-220, abril de 2012.

Synthesis between demic and cultural diffusion in the Neolithic transition in Europe. Joaquim Fort en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 109, n.º 46, págs. 18.669-18.673; 13 de noviembre de 2012. Disponible en **www.pnas.org/content/109/46/18669.full**

EN NUESTRO ARCHIVO

Primeros agricultores de la llanura del norte de Europa. Peter Bogucki y Ryszard Grygiel en *IyC*, junio de 1983.

Los comienzos de la agricultura en el noroeste de Europa. John M. Howell en *IyC*, enero de 1988.

El origen del Neolítico. Juan José Ibáñez en *IyC*, noviembre de 2009.

BIOLOGÍA

DINÁMICA Y FUNCIÓN DE LAS UNIONES

Las células contiguas intercambian información molecular a través de ca

La interrupción de este sistema de comunicación puede dar lugar a tras

Dale W. Laird, Paul D. Lampe y Ross G. Johnson

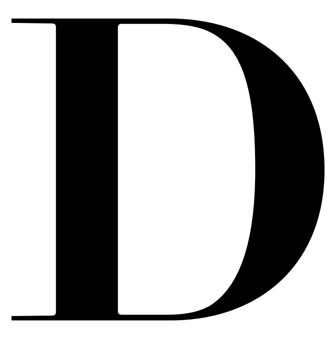
INTERCELULARES

nales que las conectan directamente entre sí.
tornos que van de la sordera a las enfermedades cardíacas

Dale W. Laird es profesor de biología celular y ostenta la Cátedra de Investigación de Canadá sobre Uniones Intercelulares y Enfermedades en la Universidad de Ontario Occidental.

Paul D. Lampe es codirector del Programa de Investigación Aplicada y miembro de las divisiones de Ciencias de la Salud Pública y de Biología Humana en el Centro de Investigación Oncológica Fred Hutchinson, en Seattle.

Ross G. Johnson es profesor emérito de genética, biología celular y desarrollo en la Universidad de Minnesota. Empezó a estudiar las uniones intercelulares en los años sesenta, poco después de que se descubriesen, y ha estado investigando su ensamblaje y regulación junto a Laird y Lampe durante más de veinte años.



EL MISMO MODO EN QUE LAS PERSONAS COMPARTEN NOTICIAS A TRAVÉS DE Twitter, Facebook o Linkedin, las células utilizan también múltiples mecanismos para el intercambio de información. Algunas producen hormonas que se desplazan a grandes distancias por el torrente sanguíneo; otras emiten neurotransmisores, que llevan mensajes de una neurona a otra. Pero, además, casi todas ellas establecen redes de comunicación con sus vecinas por medio de extensos conjuntos de canales que conectan directamente el medio interno de una célula con el de otra contigua.

A mediados de los años sesenta del siglo xx, se obtuvo una espectacular prueba de ese tipo de comunicación tras inyectar moléculas de un colorante fluorescente en una célula situada entre otras densamente empaquetadas. El examen al microscopio reveló cómo la fluorescencia se extendía con rapidez de una célula a otra y, en algunas ocasiones, se veía brillar a cientos de ellas dentro del tejido. Estudios preliminares habían sugerido que los iones transmitían señales eléctricas entre células vecinas. Pero, tras observar la propagación de las moléculas de colorante —aunque pequeñas, mayores que los iones—, se confirmó sin lugar a dudas que las células contenían canales a través de los cuales difundían un gran número de moléculas.

Hoy se sabe que esos canales se hallan por todas partes. Aparecen en grupos en los tejidos de todos los animales, humanos incluidos, e intervienen en una serie de funciones extraordinariamente variada. Estas agrupaciones, denominadas uniones intercelulares (*gap junctions*), ayudan a sincronizar el latido de las células cardíacas y la contracción del útero durante el parto. También permiten al ojo ajustarse a distintas intensidades de luz; incluso intervienen en la formación de órganos durante el desarrollo embrionario.

Durante los últimos veinte años, se ha descubierto que los defectos en el ensamblaje o en la actividad de las uniones intercelulares causan una serie de enfermedades, como sordera, cataratas, dermopatías, trastornos neurológicos, cardiopatías y varios tipos de cáncer. Una mutación en una de las proteínas que configuran tales conexiones en el oído interno causa pérdida de audición en el 40 por ciento de los individuos con sordera hereditaria. Y siguen descubriéndose nuevas dolencias relacionadas con las uniones, entre ellas cierto tipo de epilepsia infantil.

En la actualidad, están aportándose interesantes conocimientos sobre cómo se construyen esas uniones y se está empezando a desvelar el modo en que la alteración de su ensamblaje o de su actividad desencadena algunas enfermedades. Los hallazgos deberían dar lugar a nuevos tratamientos para numerosos trastornos que aparecen cuando las células dejan de compartir información.

TENDER PUENTES

Cuando se llevaron a cabo los primeros experimentos de inyección de colorantes, no se pensó en su futura repercusión en la medicina. En los años sesenta y setenta, los esfuerzos se centraban en demostrar la existencia de esa misteriosa comunicación entre células y en aprender más sobre sus propiedades. Antes de que se identificasen las uniones intercelulares y se les pusiera nombre, los fisiólogos descubrieron que esta forma de compartir información molecular se presentaba en multitud de órganos y organismos, desde los embriones de calamar y peces eléctricos hasta diversas células de mamífero. Y confirmaron que las moléculas se desplazaban de una célula a otra en los puntos donde sus membranas establecían un estrecho contacto.

EN SÍNTESIS

Las células intercambian información con sus vecinas inmediatas a través de unas estructuras denominadas uniones intercelulares comunicantes. Tal sistema de comunicación se halla implicado en distintos procesos, desde el latido sincronizado de las células cardíacas hasta la audición.

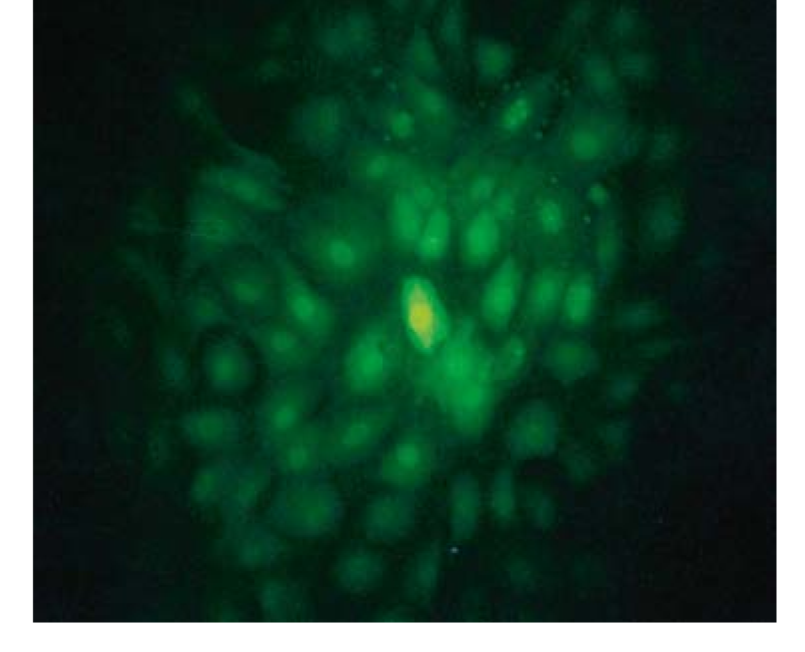
Aunque las uniones intercelulares son complejas y suelen estar formadas por más de 100.000 moléculas proteicas, se destruyen y se reconstruyen sin cesar. Esta reestructuración, perfectamente controlada, permite a las células reaccionar con rapidez ante las heridas o el estrés.

Las mutaciones genéticas que codifican las proteínas de esas uniones dan lugar a una serie de enfermedades, como dermopatías, cardiopatías, epilepsia y sordera. Conocer el efecto de estas anomalías en el ensamblaje y actividad de las uniones podría contribuir al desarrollo de nuevos tratamientos.

PÁGINAS ANTERIORES: PETER KRAEMER

A finales de los años sesenta, los científicos se propusieron determinar qué aspecto tenían esos canales y cómo se formaban. Estudios microscópicos previos habían puesto de manifiesto la presencia de grandes regiones planas allí donde las membranas de dos células se juntaban. En tales lugares, las células parecían estar separadas por un espacio muy estrecho, de tan solo unos pocos nanómetros de espesor. Después se descubrió que este espacio no estaba vacío, sino que era ocupado por las partes de los canales que conectan una célula con otra.

Para determinar la influencia de esas zonas planas de la membrana en la conectividad celular observada en los experimentos eléctricos y los ensayos con colorantes, uno de nosotros (Johnson) comenzó a estudiar lo que sucedía a medida que se ensamblaban las uniones. Junto con colaboradores de la Universidad de Minnesota, separó unas de otras las células de un cultivo procedente de un tumor hepático y, a continuación, las volvió a mezclar. En unos minutos aparecieron regiones aplanadas en las membranas celulares, pero solo allí donde dos células entraban en contacto. El hallazgo confirmaba la sospecha de que para la formación de las conexiones se necesitaba la participación de las dos células adyacentes. A medida que las regiones planas se expandían y maduraban, también aumentaba la corriente eléctrica que circulaba entre las células. Las uniones parecían facilitar el intercambio de iones.



EL COLORANTE INYECTADO en una célula de un cultivo (*centro*) llegó rápidamente a otras células a través de los canales de las uniones intercelulares que conectan entre sí células vecinas.

CORTESÍA DE MICHAEL ATKINSON Y JUDSON SHERIDAN, UNIVERSIDAD DE MINNESOTA

Tras extraer las membranas de las células conectadas para examinarlas más de cerca, Johnson y su equipo observaron partículas de gran tamaño que se habían acumulado en las regiones aplanadas. Más tarde se comprobó que tales partículas correspondían a los canales que constituyen los elementos básicos de las uniones intercelulares. Cada canal está formado por unas moléculas denominadas conexinas, una familia de proteínas identificada a finales de los años ochenta.

Seis moléculas de conexina se agrupan para formar una estructura con forma de rosquilla que se denomina hemicanal. Este se inserta en la membrana externa de la célula, donde puede interaccionar con el hemicanal de una célula vecina. Cuando las conexinas de estos hemicanales enfrentados interaccionan se forma un poro que conecta las células, de manera que se establece una comunicación directa entre sus respectivos citoplasmas. Este poro es, de hecho, uno más de entre los cientos o miles de canales individuales que forman cada unión intercelular.

La construcción de esos enormes conglomerados de comunicación supone un esfuerzo colosal para las células. Una sola unión puede contener hasta 10.000 canales. Como cada uno de ellos está formado por dos hemicanales, se necesitaría un total de 120.000 moléculas de conexina para cada unión. Solo el corazón ya comprende miles de millones de células, y cada una de ellas interacciona con otras contiguas por medio de uniones intercelulares. En otras palabras, la creación de estas enormes estructuras constituye una maravilla de la ingeniería molecular.

Y todavía resulta más extraordinario que las conexiones no sean permanentes, ni siquiera de larga duración, sino que se hacen y deshacen sin cesar. Se ha demostrado que la mitad de las conexinas de una unión se renueva cada dos horas. Lo más probable es que, en el transcurso del día, todas y cada una de las uniones intercelulares en el corazón humano desaparezcan para ser sustituidas por canales recién ensamblados.

Dada la complejidad de esas notables estructuras, cabía esperar que existieran sistemas que garantizaran su formación y evitaran la pérdida de comunicación entre las células. Para llegar a comprender estos mecanismos de regulación, los tres autores de este artículo, que ya estábamos estudiando las uniones intercelulares, decidimos poner en común nuestras experiencias respectivas; en concreto, queríamos investigar cómo se controlaba la creación y destrucción de estos vastos canales de comunicación.

AUNAR ESFUERZOS

Diseñamos nuestro plan de colaboración en un congreso sobre uniones intercelulares celebrado en el Centro de Conferencias Asilomar, en Pacific Grove, California. Corría el año 1991, y uno de nosotros (Lampe) era becario posdoctoral en el laboratorio de Johnson en la Universidad de Minnesota, donde se intentaba averiguar cómo se regulaba la formación de las uniones. El tercer miembro de nuestro trío (Laird), a la sazón becario posdoctoral en el laboratorio de Jean-Paul Rebel, en el Instituto de Tecnología de California, acababa de desarrollar un conjunto de moléculas de anticuerpos que se fijaban de manera específica a las conexinas. Estos anticuerpos nos permitirían interaccionar con las conexinas y ver qué fragmentos de las moléculas resultaban cruciales para la formación y actividad de las uniones intercelulares.

Los anticuerpos de Laird reconocían un tipo concreto de conexina: la Cx43. Los humanos poseemos genes que codifican 21 conexinas distintas, y cada tipo celular produce su propio conjunto particular de ellas. Las células cutáneas, las más activas, presentan hasta nueve. Sin embargo, la Cx43 es el miembro de la familia que más se ha prodigado y se halla en multitud de órganos, como la piel, el corazón, el cerebro, los pulmones y los huesos.

Igual que todas las conexinas, la Cx43 consta de cuatro segmentos que atraviesan la membrana celular y la anclan a ella. La cola de la molécula, que queda colgando hacia el interior de la célula, contiene una serie de elementos que, según comprobamos más tarde, regulan su actividad y el ensamblaje de los canales y uniones. Y dos de los bucles que forma la proteína al extenderse de un lado a otro de la membrana quedan orientados hacia el espacio que hay entre las células. Algunos de los

anticuerpos que había generado Laird se unían específicamente a esos segmentos.

Como los bucles sobresalen de la superficie celular, parecía razonable pensar que podrían funcionar como una suerte de ganchos que permitirían a las conexinas agarrarse entre sí. Para verificar esta idea, separamos de nuevo las células en un cultivo para después volverlas a mezclar, pero esta vez añadimos los anticuerpos de Laird. Las uniones intercelulares no se formaban; no observamos ni la transferencia de una célula a otra del colorante inyectado ni la aparición de las regiones planas características de las uniones. Al fijarse a los bucles, los anticuerpos impedían que las conexinas de una célula se acoplaran a las de otra.

Los estudios con anticuerpos demostraron que la asociación entre conexinas resultaba fundamental para la construcción de las uniones. Pero se necesitaba otra técnica para observar las conexinas en tiempo real, cuando transitan por el interior de una célula viva.

PROTEÍNAS QUE SE DESPLAZAN

En 1994, volvimos a coincidir los tres en un nuevo evento, esta vez en el congreso de la Sociedad Americana de Biología Celular celebrado en San Francisco. Hasta bien entrada la noche, mantuvimos tertulias sobre las presentaciones que habíamos escuchado. Nos despertaba especial entusiasmo la proteína fluorescente verde (GFP, por sus siglas en inglés), una herramienta molecular cuya utilidad acabaría siendo reconocida con la concesión de un premio Nobel. Una conferenciante había descrito cómo había enlazado este marcador a la proteína que estaba estudiando para seguir el rastro de sus desplazamientos en las células vivas. Se nos ocurrió entonces que tal vez podríamos utilizarlo nosotros para monitorizar los movimientos de las conexinas.

Comenzamos por incorporar la GFP a uno de los extremos de las conexinas. Para gran satisfacción nuestra, la estrategia funcionó: las moléculas marcadas se insertaban correctamente en la membrana celular, donde se ensamblaban para formar uniones intercelulares que mostraban casi las mismas propiedades que las constituidas por conexinas sin modificar. Ahora disponíamos de un potente sistema para observar el comportamiento de estas moléculas dentro de las células, un trabajo que Laird continuó en su nueva plaza en la Universidad de Ontario Occidental.

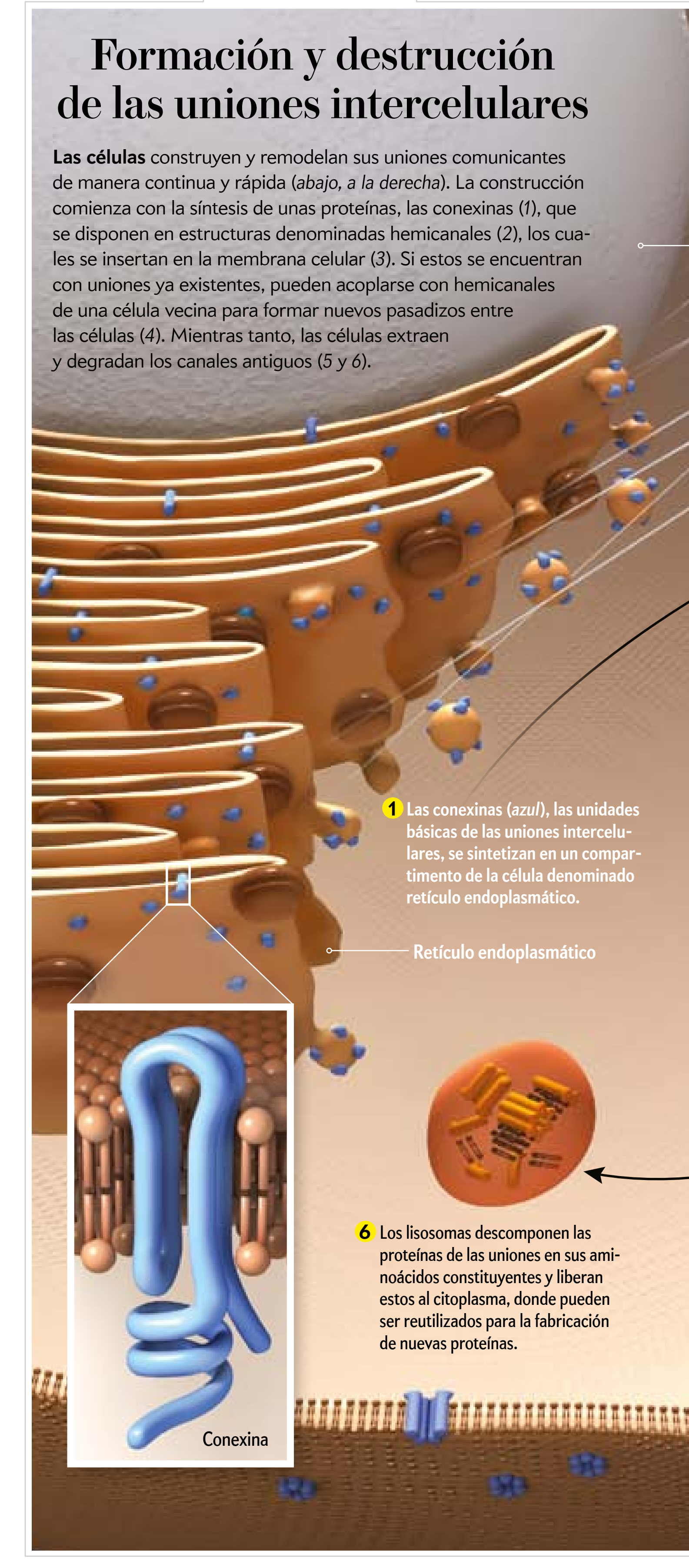
Nuestras primeras observaciones nos asombraron. Al principio, cada diez minutos tomábamos fotografías de las células que contenían conexinas marcadas; pensábamos que podríamos utilizar las imágenes para generar una secuencia animada que reprodujese el movimiento de las proteínas. Pero estas se desplazaban con tanta rapidez que no lográbamos distinguir una de otra ni determinar hacia dónde se desplazaba cada una. Volvimos a intentarlo obteniendo fotografías cada dos minutos, pero ese lapso de tiempo todavía resultaba inadecuado. Para observar el movimiento de las conexinas dentro de la célula, tuvimos que tomar fotografías cada pocos segundos.

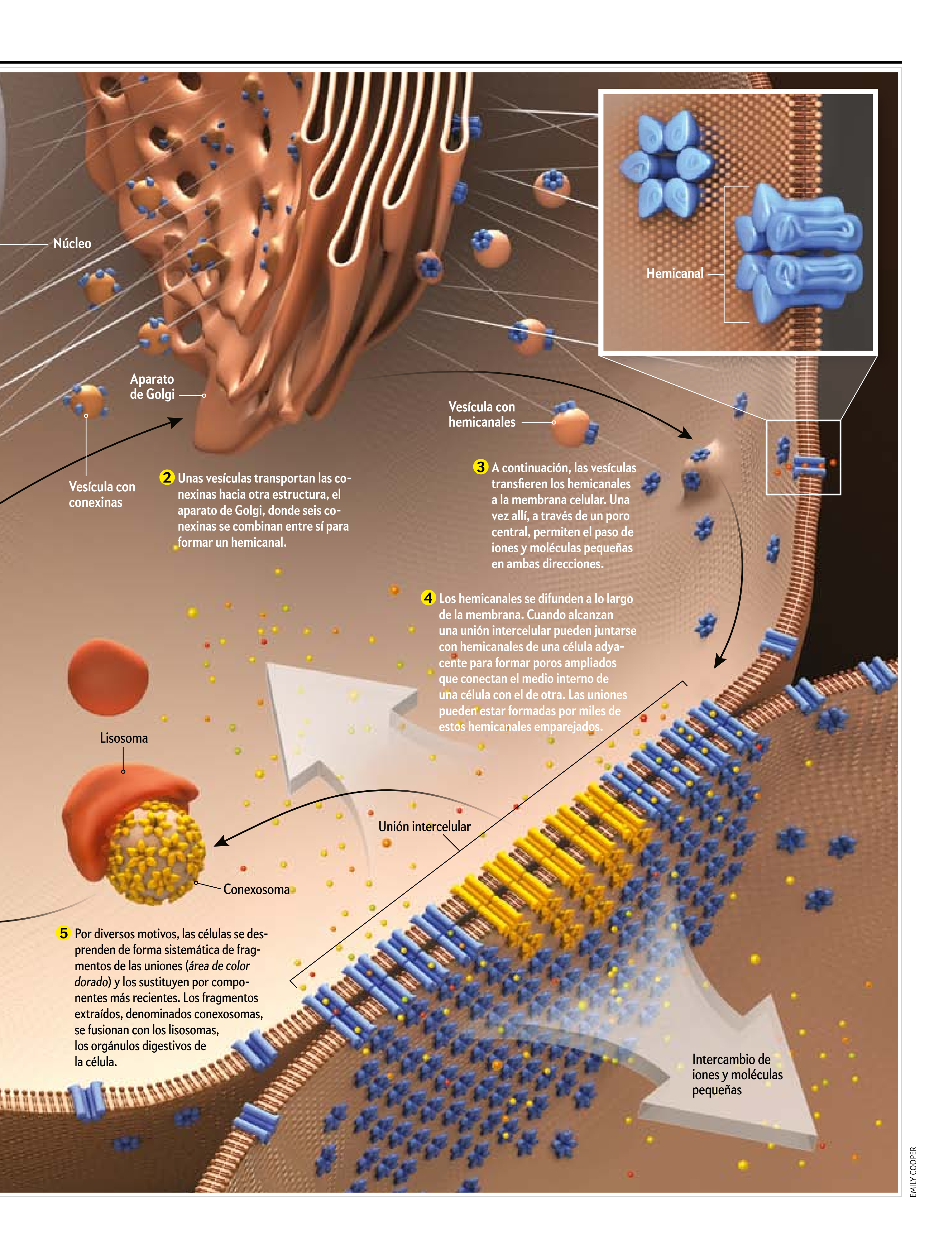
Las películas no solo nos permitieron seguir el desplazamiento de las conexinas, sino también el de los hemicanales, que recorrían la célula por medio de senderos moleculares construidos a partir de unas estructuras denominadas microtúbulos. Nosotros, y también otros investigadores, vimos que las uniones más pequeñas se combinaban para formar otras más grandes, un hecho que ya habíamos sospechado a raíz de nuestros estudios de microscopía electrónica. También demostramos que las conexiones más extensas podían dividirse para formar otras de menor tamaño, un tipo de remodelación que tiene lugar a medida que las células crecen, se mueven, se doblan o se dividen.

IDEAS BÁSICAS

Formación y destrucción de las uniones intercelulares

Las células construyen y remodelan sus uniones comunicantes de manera continua y rápida (*abajo, a la derecha*). La construcción comienza con la síntesis de unas proteínas, las conexinas (*1*), que se disponen en estructuras denominadas hemicanales (*2*), los cuales se insertan en la membrana celular (*3*). Si estos se encuentran con uniones ya existentes, pueden acoplarse con hemicanales de una célula vecina para formar nuevos pasadizos entre las células (*4*). Mientras tanto, las células extraen y degradan los canales antiguos (*5 y 6*).




Núcleo
Aparato de Golgi
Vesícula con conexinas
2 Unas vesículas transportan las conexinas hacia otra estructura, el aparato de Golgi, donde seis conexinas se combinan entre sí para formar un hemicanal.
Vesícula con hemicanales
Hemicanal
3 A continuación, las vesículas transfieren los hemicanales a la membrana celular. Una vez allí, a través de un poro central, permiten el paso de iones y moléculas pequeñas en ambas direcciones.
4 Los hemicanales se difunden a lo largo de la membrana. Cuando alcanzan una unión intercelular pueden juntarse con hemicanales de una célula adyacente para formar poros ampliados que conectan el medio interno de una célula con el de otra. Las uniones pueden estar formadas por miles de estos hemicanales emparejados.
Lisosoma
Unión intercelular
Conexosoma
5 Por diversos motivos, las células se desprenden de forma sistemática de fragmentos de las uniones (*área de color dorado*) y los sustituyen por componentes más recientes. Los fragmentos extraídos, denominados conexosomas, se fusionan con los lisosomas, los orgánulos digestivos de la célula.
Intercambio de iones y moléculas pequeñas
EMILY COOPER

Nuestros colegas diseñaron más métodos para marcar las conexinas y descubrieron que las uniones se ampliaban mediante la adición de hemicanales en su perímetro, de forma que la parte central de una unión correspondía a la sección más vieja. Parece que estos componentes más antiguos van desapareciendo a medida que la unión envejece, hecho que podría explicar cómo se mantienen las uniones al tiempo que van perdiéndose las conexinas de la región interna; los canales más recientes se desplazan hacia el interior para sustituir a los más antiguos.

Quizá lo más sorprendente de nuestros estudios con células vivas fue descubrir que estas pueden llevarse grandes porciones de las uniones. Ello sucede cuando una de las dos células contiguas se queda con un fragmento de la otra, un mecanismo que otros expertos habían propuesto basándose en ciertas imágenes de microscopía electrónica obtenidas con anterioridad. Esta drástica maniobra arranca de un tirón los componentes de las uniones aportados por ambas células, lo que podría representar una forma segura de interrumpir con rapidez la comunicación entre ellas cuando esta deja de necesitarse. Tal proceso tiene lugar a gran escala en el útero después del parto, cuando se desactivan las redes de comunicación que se habían formado para coordinar las contracciones.

EL CONTROL SOBRE LAS UNIONES

Tras saber que las uniones intercelulares se renovaban constantemente, nos dispusimos a investigar cómo supervisaban las células esa masiva remodelación molecular. Los estudios preliminares sugerían la participación de unas enzimas denominadas cinasas. Estas moléculas tienen la capacidad de alterar la actividad de una proteína concreta o su localización en la célula mediante la sencilla operación de añadir a ella grupos fosfato.

Nos preguntamos, pues, si las cinasas también regularían el comportamiento de las conexinas y, de ser así, qué consecuencias tendría tal fosforilación. En 1994, Lampe emprendió investigaciones para resolver esta cuestión, tras poner en marcha su laboratorio en el Centro de Investigación Oncológica Fred Hutchinson, en Seattle. Mediante la extracción de Cx43 y el examen consecutivo de pequeños fragmentos de la molécula, descubrieron que, a lo largo de su vida, esta conexina resulta fosforilada en hasta 15 lugares distintos de la cola. El hallazgo nos permitió descifrar parte del código regulador que controla la formación de las uniones que contienen Cx43. Cuando ciertas cinasas actúan sobre determinadas regiones de la cola de la molécula, la modificación intensifica el ensamblaje de las uniones constituidas por Cx43; otras cinasas que actúan sobre regiones distintas de la cola inhiben la formación o la actividad de las uniones, o bien reducen su tamaño.

Con los conocimientos adquiridos sobre el código regulador, hoy podemos analizar muestras de tejidos humanos y estudiar cómo los cambios en la fosforilación alteran la formación y funcionamiento de las uniones intercelulares en respuesta a una lesión o durante una enfermedad. Nuestro grupo y otros hemos comenzado a determinar el modo en que se modifica la comunicación a través de las uniones cuando las células cardíacas tratan de recuperarse de la falta de oxígeno tras un infarto, o cuando las células cutáneas se movilizan para curar un corte o un rasguño. En ambos casos, el equipo de Lampe descubrió que la fosforilación aumentaba en un lugar concreto de la cola de Cx43. Ello hace agrandar durante un breve tiempo el tamaño de las uniones en estos tejidos, al impedir la interacción de Cx43 con una proteína (estudiada por otros grupos) que limita la capacidad de las nuevas conexinas para integrarse en uniones ya existentes. La ampliación resultante de las uniones sirve para incrementar la comunicación —un aspecto esencial en los primeros minutos posteriores a una lesión—, lo que ayuda a mantener la función en el tejido cardíaco y facilita la migración de las células cutáneas necesarias para cerrar una herida abierta.

Saber cómo influye la fosforilación en el ensamblaje y funcionamiento de las conexinas —y cómo cambia la comunicación a través de las uniones intercelulares en respuesta a una lesión o enfermedad— ha impulsado el desarrollo de compuestos que promuevan o inhiban la actividad de cinasas importantes. Sin embargo, estas estrategias terapéuticas deben examinarse con precaución, ya que un aumento de las uniones intercelulares durante una etapa de la enfermedad podría resultar perjudicial más adelante. Así, justo después de producirse una herida, las uniones aumentan brevemente de tamaño, pero más tarde se degradan con rapidez para promover una curación adecuada. En las personas que padecen diabetes, el cierre de las heridas se retrasa por una sobreproducción continuada de Cx43. Y cuando la córnea sufre rasguños, las conexinas impulsan la inflamación y la cicatrización, pero no la curación. Si en tales casos se limita la producción o la función de Cx43 en las células que rodean la lesión, se favorecerá la reparación de esta sin crear cicatrices, una estrategia que está siendo investigada por varias compañías biotecnológicas.

Conocer el efecto de las mutaciones en las uniones intercelulares ayudaría a crear terapias que corrigiesen tales anomalías sin provocar reacciones secundarias graves

Sin embargo, para sacar el máximo provecho de nuestros conocimientos sobre la biología de las uniones intercelulares y aplicarlos al diseño de tratamientos, se necesita entender mejor cómo se agrupan las conexinas en diferentes tejidos y condiciones, y cómo se altera su agregación y su función en caso de enfermedad. El estudio de mutaciones de genes que codifican conexinas y que dan lugar a un trastorno está empezando a aportar algunos datos útiles.

CONEXIONES INTERRUMPIDAS

A mediados de los años noventa, se aportaron las primeras pruebas genéticas sólidas sobre la implicación de las conexinas en ciertas dolencias. Se descubrieron mutaciones en el gen que codifica Cx32, las cuales provocan una forma de la neuropatía denominada enfermedad de Charcot-Marie-Tooth. En este trastorno, las uniones intercelulares de las vainas de mielina que aíslan los nervios desaparecen, lo que causa una degradación de la mielina y la degeneración del nervio; a su vez, esa pérdida provoca atrofia y debilidad muscular, especialmente en las extremidades [*véase* «Enfermedad de Charcot-Marie-Tooth», por Francesc Palau; Investigación y Ciencia, mayo de 2003].

Tras el descubrimiento de que las mutaciones en los genes de la conexina entrañaban graves consecuencias fisiológicas, el campo de las uniones intercelulares ha acaparado el interés

de médicos e investigadores dispuestos a determinar la base genética de estas dolencias. Estudios adicionales han puesto de manifiesto nuevas mutaciones de las conexinas y, hoy en día, se sabe de la existencia de 14 enfermedades que se deben a anomalías en estas proteínas.

Lo más sorprendente de ese conjunto de trastornos es la disparidad que hay entre ellos. Además de la enfermedad degenerativa de Charcot-Marie-Tooth, las mutaciones de las conexinas provocan sordera, epilepsia, cardiopatías, trastornos cutáneos, cataratas y toda una serie de enfermedades del desarrollo embrionario. Como cabría esperar, distintas mutaciones se asocian a distintas enfermedades. Pero, de modo asombroso, se ha descubierto que las conexinas mutantes no provocan necesariamente los mismos efectos en todos los tejidos u órganos; si la proteína alterada se produce en dos órganos, esta podría impedir la función de uno de ellos pero no la del otro.

Numerosos grupos de investigación se están esforzando por comprender ese fenómeno. Una explicación podría ser que, en determinados tejidos, otras conexinas sanas compensaran los efectos de una variante defectuosa, lo que mantendría una comunicación suficiente a través de las uniones. Tal compensación podría tener lugar en unos tejidos pero no en otros. O, quizás, una conexina desempeñe una función en un tejido y otras distintas en otros, dependiendo de qué otras conexinas se hallen presentes. Los diversos miembros de la familia de estas proteínas pueden también entremezclarse y dar lugar a canales híbridos que facilitarían el paso de distintas señales moleculares, algunas de las cuales son más importantes en un tejido que en otro.

En ciertas conexinas, sin embargo, los defectos ponen en peligro múltiples tejidos. Consideremos uno de los trastornos que estamos estudiando, la displasia oculodentodigital, causada por mutaciones en el gen *Cx43*. Las personas que la padecen muestran una serie de síntomas, entre ellos ojos pequeños, dentadura poco desarrollada, deformidades esqueléticas en la cara y en la cabeza y membranas interdigitales en pies y manos. Algunos pacientes desarrollan también una dermopatía que da lugar a gruesos callos escamosos en las palmas de las manos y en las plantas de los pies. Estudios recientes sobre el ciclo vital de las conexinas han aportado ciertos indicios sobre por qué algunas personas presentan una forma más grave de la enfermedad que otras.

Entre los afectados se han identificado más de setenta mutaciones en *Cx43*, y nos dispusimos a investigar cómo alteraban esas mutaciones la proteína y, en consecuencia, la creación de las uniones intercelulares. Laird y sus colaboradores han descubierto que muchas de las mutaciones del gen *Cx43* producen una conexina que llega a la membrana celular pero no forma uniones funcionales: los colorantes no las atraviesan, lo que indica que sus canales no están correctamente ensamblados o no permiten el paso de señales moleculares. En cualquier caso, estas anomalías disminuyen la comunicación entre las células.

Otras mutaciones observadas en la displasia oculodentodigital evitan que las conexinas alcancen la membrana celular. Por lo general, los pacientes que las presentan sufren la forma más grave de la enfermedad, que conlleva trastornos cutáneos y otros defectos. Tal hallazgo sugiere que los hemicanales de conexina podrían desempeñar una función que va más allá de la construcción de las uniones intercelulares. De ahí que, cuando esta función no se lleva a cabo (como ocurre cuando las conexinas no logran llegar a la membrana celular), surgen problemas más graves. Quizás, en vez de emparejarse para formar canales, algunos hemicanales permanezcan desacoplados, lo que permite a las células liberar señales o captar moléculas de su entorno. Estas moléculas pueden ser distintas de las que suelen atravesar los canales de las uniones. Tal actividad de los hemicanales se ha demostrado experimentalmente, lo que añade una nueva dimensión a nuestra forma de entender el papel de las conexinas en la comunicación celular. Las investigaciones futuras sobre los hemicanales mutantes podrían revelar nuevas dianas (como moléculas aún no identificadas que atravesarían los hemicanales desacoplados) para el tratamiento de la displasia y de otras enfermedades asociadas a las conexinas.

DESVELAR LOS SECRETOS

Estudiar el modo en que las mutaciones modifican la formación y comportamiento de las uniones intercelulares podría también llevar al desarrollo de terapias muy específicas que contrarrestasen los efectos de una mutación sin desencadenar reacciones secundarias graves. De este modo, la identificación de una mutación que altera el ensamblaje de una unión intercelular (pero no el transporte de las conexinas hasta la superficie celular), podría orientar la creación de un fármaco que restableciera la capacidad de la conexina para formar un canal funcional. Este tipo de terapias dirigidas permitiría recobrar la comunicación celular sin tener que reemplazar la totalidad de las conexinas mutantes; ello implicaría el empleo de terapia génica, una estrategia arriesgada que aún se halla en fase experimental.

Descubrir mutaciones de las conexinas que causan enfermedades no solo revela dianas terapéuticas prometedoras. También dota a los investigadores de un nuevo conjunto de herramientas para estudiar la biología básica de las uniones intercelulares. Por ejemplo, aún no conocemos por completo las moléculas que atraviesan las uniones. En el caso de las células cardíacas, sabemos que los iones que fluyen a través de ellas transportan señales eléctricas de una a otra. Pero apenas tenemos idea de qué intercambian las células para mantener la función del aparato auditivo o la respuesta que cura las heridas cutáneas. Si investigamos cómo se comportan los canales de conexina en los distintos tipos celulares y cómo los cambios en su ensamblaje y actividad generan enfermedades, al final podremos abordar las cuestiones más importantes relacionadas con esta forma de comunicación celular: ¿qué es exactamente lo que una célula «susurra» a otra? ¿Cómo dirigen estos secretos moleculares el ensamblaje y el funcionamiento de organismos complejos, incluidos nosotros mismos?

PARA SABER MÁS

Trafficking, assembly, and function of a connexin43-green fluorescent protein chimera in live mammalian cells. Karen Jordan et al. en *Molecular Biology of the Cell*, vol. 10, n.º 6, págs. 2033-2050, junio de 1999.

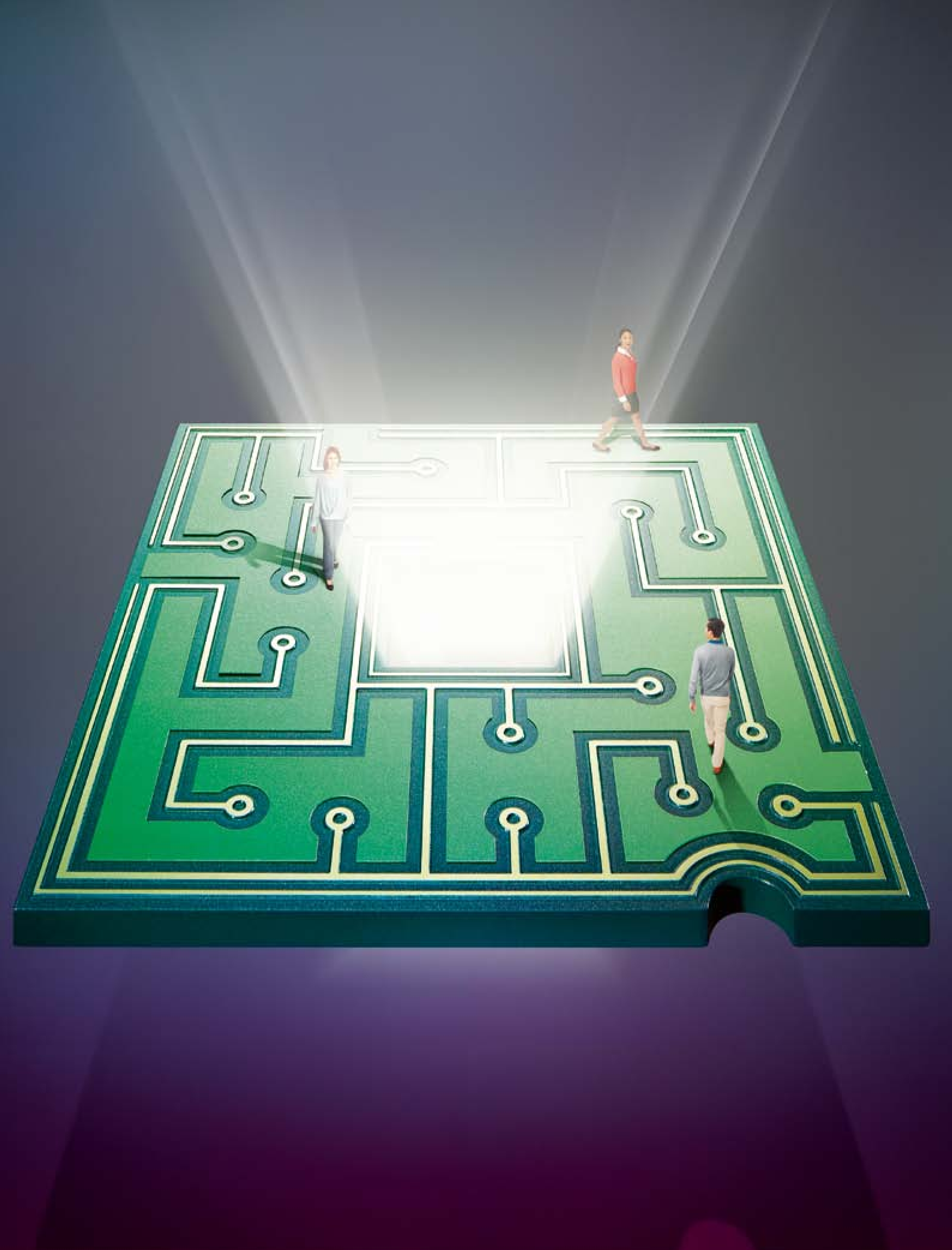
Gap junction assembly: Roles for the formation plaque and regulation by the c-terminus of connexin43. Ross G. Johnson et al. en *Molecular Biology of the Cell*, vol. 23, n.º 1, págs. 71-86, enero de 2012.

Mutants, mice & melanomas. Entrevista con Dale W. Laird en *International Innovation*, n.º 115, págs. 22-24, octubre de 2013.

Specific Cx43 phosphorylation events regulate gap junction turnover in vivo. Joell L. Solan y Paul D. Lampe en *FEBS Letters*, vol. 588, n.º 8, págs. 1423-1429, abril de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Uniones intercelulares. L. Andrew Staehelin y Barbara E. Hull en *IyC*, julio de 1978.



INFORMÁTICA

MÁS ALLÁ DE LA LEY DE MOORE



John Pavlus

Ante el límite físico al que se enfrenta la miniaturización de los transistores, los fabricantes han decidido invertir millones en el desarrollo de nuevas técnicas de cómputo

En una minúscula sala de conferencias sin ventanas de las oficinas de I+D de Intel, Mark Bohr, director de integración y arquitectura de procesos, explica que la ley de Moore, tal y como suele entenderse, ha muerto. De hecho, murió hace ya algún tiempo. El veredicto de Bohr tal vez sorprenda, pues su trabajo consiste justamente en aplicar la ley de Moore: ingeniárselas para reducir a la mitad el tamaño de los transistores actuales de Intel, de 14 nanómetros, en lo que queda de década. Pero Bohr ni siquiera pestañea: «La era de la compresión tradicional de transistores, consistente en reducir la misma estructura básica fabricada con los mismos materiales, terminó hace unos diez años».

En 1965, Gordon Moore, por entonces director de I+D en Fairchild Semiconductor, publicó un artículo titulado «Cómo encajar más componentes en los circuitos integrados». En él vaticinó que el número de transistores que podrían incorporarse en un chip a un coste óptimo se duplicaría cada año. Una década después revisó su predicción y estableció lo que hoy conocemos como ley de Moore, según la cual el número de transistores se dobla cada dos años.

Los circuitos integrados hacen funcionar los ordenadores, pero la ley de Moore los hace evolucionar. Los transistores (diminutos interruptores que codifican los unos y los ceros en forma de diferencias de voltaje) constituyen los «átomos» del cálculo electrónico. Por eso, duplicar la cantidad de ellos que caben en un mismo espacio físico equivale a multiplicar por dos la cantidad de cálculos que pueden efectuarse a un mismo precio. El primer microprocesador genérico de Intel, el 8080, comercializado en 1974, contribuyó a la revolución de los ordenadores personales. Aquella oblea de silicio de dos pulgadas y con forma de chocolatina contenía 4500 transistores.

FOTOILUSTRACIÓN DE DAN SAELINGER



John Pavlus es escritor y cineasta especializado en ciencia, tecnología y diseño. Entre otros medios, ha escrito para *Wired, Nature* y *MIT Technology Review*.

En estos momentos, las unidades centrales de procesamiento (CPU) de los servidores de alto rendimiento de Intel (los chips más densos disponibles en el mercado) incluyen 4500 millones de transistores. En las fábricas de Intel en Hillsboro, en Oregón, los procesos de producción más modernos de la compañía graban en una oblea de silicio componentes de 14 nanómetros, más delgados que el flagelo de una bacteria. Ese crecimiento exponencial en la densidad de transistores ha transformado las grandes calculadoras de válvulas de vacío, que a mediados del siglo xx ocupaban una habitación, en las maravillas de silicio que tenemos hoy.

Pero incluso la ley de Moore cede ante las leyes de la física. En menos de una década, ya no será posible mantener ese ritmo de miniaturización. Por ello, fabricantes como Intel, IBM y Hewlett-Packard (HP) destinan miles de millones a desentrañar cómo será el mundo después de la ley de Moore. Su muerte obligará a dinamitar algunos de los postulados básicos de la tecnología actual. ¿Debe ser un chip informático una matriz bidimensional de conexiones grabadas en silicio? IBM cree que no, por lo que está investigando la posibilidad de fabricarlos con grafeno y nanotubos de carbono. ¿Seguirán siendo necesarios los electrones? IBM y HP apuestan por la fotónica, que usa pulsos de luz en vez de voltajes.

HP ha ido aún más lejos y se ha propuesto refundar los principios básicos de la electrónica. Un prototipo de la compañía, bautizado con el nombre clave de «La Máquina», se basa en un eslabón perdido de la electrónica que los expertos llevaban largo tiempo buscando: el memristor. Aunque este componente fue predicho matemáticamente hace décadas, su primera materialización práctica no llegó hasta hace poco. Su característica principal reside en que combina memoria y procesamiento. Si se emplearan memristores en lugar de transistores, la recurrente metáfora de la CPU como «cerebro» del ordenador sería aún más acertada. El funcionamiento de los memristores resulta similar al de las neuronas, las cuales transmiten y codifican la información además de almacenarla. Su uso incrementaría de manera espectacular la eficiencia de cómputo y paliaría los efectos del llamado «cuello de botella de Von Neumann», que ha limitado la computación durante medio siglo [*véase* «El alba de la memcomputación», por Massimiliano Di Ventra y Yuriy V. Pershin, *en este mismo número*].

Por el momento, ninguna de estas técnicas se halla lista para reemplazar a los chips de nuestros portátiles o teléfonos inteligentes. Pero, hacia finales de la década, al menos una de ellas deberá incrementar el rendimiento de los ordenadores allí donde los circuitos de silicio tradicionales ya no puedan. La pregunta es cuál de ellas lo logrará y cuándo veremos el cambio.

MÁS ALLÁ DEL SILICIO

La idea tras la ley de Moore es sencilla: reducir a la mitad el tamaño de un transistor implica duplicar el rendimiento computacional con el mismo coste. Sin embargo, siempre ha habido algo más. El artículo de Moore de 1965 predecía la tasa de crecimiento que experimentaría la densidad de transistores, pero no describía qué mecanismo lo haría posible. Tuvieron que transcurrir nueve años hasta que Robert Dennard, científico de IBM, publicó una explicación del fenómeno. La «ley de escala de Dennard» prescribe que la densidad de potencia de un MOSFET (siglas de «transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor», la técnica dominante en 1974) permanece constante cuando se reduce su tamaño físico. En otras palabras, la potencia necesaria por unidad de volumen no cambia, por lo que el voltaje y la corriente requeridos para encender y apagar un MOSFET más pequeño disminuyen.

Durante treinta años, la ley de Dennard garantizó el cumplimiento de la predicción de Moore. El constante aumento en el rendimiento de los PC ayudó a la gente a emprender nuevos negocios, diseñar productos, curar enfermedades, guiar naves espaciales y democratizar Internet. Pero un buen día dejó de funcionar. Cuando los componentes grabados en silicio llegaron a los 65 nanómetros (la mitad que un VIH), los electrones comenzaron a filtrarse de los transistores debido a los efectos cuánticos. Los dispositivos se habían vuelto demasiado pequeños para cambiar de manera fiable entre los estados de «encendido» y «apagado». Y, en un ordenador digital, no poder diferenciar con claridad un 0 de un 1 acarrea serios problemas. Además, los investigadores de IBM e Intel se habían topado con la «barrera de frecuencia», el límite en la velocidad a la que una CPU de silicio puede ejecutar operaciones lógicas (unos 4000 millones por segundo) sin derretirse por exceso de calor.

Desde un punto de vista técnico, sin embargo, la ley de Moore podía seguir aplicándose. Intel lo hizo y continuó integrando transistores cada vez menores en sus obleas de silicio, pero ello no se tradujo en ordenadores más baratos ni más rápidos.

Desde el año 2000, los ingenieros han ideado varios rodeos para abordar esos problemas. Han logrado sortear la barrera de frecuencia con CPU multinúcleo (un procesador de 10 gigahercios tal vez se queme, pero cuatro, ocho o dieciséis de 3 GHz que trabajen juntos no). Las fugas de los transistores han podido evitarse mediante puertas triples que controlan el flujo de corriente desde tres lados en lugar de uno. Y se han construido sistemas que redirigen a otro procesador aquellas tareas demasiado pesadas para la CPU (la pantalla de un iPhone 6, por ejemplo, cuenta con su propio procesador gráfico de cuatro núcleos). Sin embargo, nada de ello cambiará el hecho de que a la miniaturización del silicio le queda menos de una década de vida.

EN SÍNTESIS

Hasta ahora, el progreso informático ha dependido de la ley de Moore: la predicción de que, cada dos años, el número de transistores contenidos en un chip se duplicaría. Sin embargo, la miniaturización de estos componentes se topará pronto con sus límites físicos.

Por esa razón, los fabricantes de microchips han comenzado a invertir miles de millones en el desarrollo arquitecturas informáticas, memorias y sistemas de procesamiento completamente nuevos, algunos de ellos basados en materiales distintos del silicio.

Aunque aún es pronto para saber qué técnicas emergerán durante los próximos años, todo apunta al nacimiento de una «computación heterogénea», caracterizada por integrar sistemas específicos que ejecuten tareas antaño asignadas a un único procesador central.

Así las cosas, algunos fabricantes de chips ya han comenzado a buscar alternativas al silicio. El año pasado, IBM anunció una partida de 3000 millones de dólares para investigar la computación postsilicio. Por ahora, el material más estudiado es el grafeno, formado por láminas de carbono de solo un átomo de espesor. Al igual que el silicio, posee propiedades electrónicas útiles que permanecen estables en un amplio intervalo de temperaturas. Además, conduce la electricidad con gran eficiencia y se presta a la miniaturización, al menos en el laboratorio. Ya se han construido transistores de grafeno que, con una densidad de potencia razonable, operan entre cientos y miles de veces más rápido que los dispositivos de silicio de alto rendimiento, incluso por debajo del umbral de los 5 nanómetros a partir del cual el silicio adquiere un comportamiento cuántico.

No obstante, el grafeno carece de «banda prohibida»; es decir, de la diferencia energética que separa los electrones que conducen la electricidad de los que se encuentran ligados a los átomos de la red. En los metales tampoco existe una banda prohibida, por lo que son conductores puros. Pero, sin ese salto energético característico de los semiconductores, como el silicio, resulta muy difícil contener el flujo de corriente que cambia el estado de un transistor de 0 a 1. Ello implica que un dispositivo de grafeno no podrá codificar de manera fiable la lógica digital. «Hemos liderado este campo, pero los resultados no han sido alentadores», admite Supratik Guha, director de ciencias físicas en el Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM. «El grafeno debería ser muy barato y ofrecer alguna ventaja extraordinaria para desplazar a los materiales existentes. Presenta propiedades muy interesantes, pero no hemos logrado identificar ninguna aplicación rompedora.»

Más prometedores parecen los nanotubos de carbono. Al enrollar láminas de grafeno para formar cilindros huecos, el material adquiere una pequeña banda prohibida, lo que brinda la posibilidad de emplearlo para fabricar transistores. «Somos prudentemente optimistas», señala Guha. «Uno a uno, los nanotubos de carbono de diez nanómetros superan a cualquier otra alternativa disponible. Según nuestras simulaciones, cabe esperar que el rendimiento o la eficiencia energética se multipliquen por cinco [con respecto al silicio].»

Sin embargo, los nanotubos de carbono son demasiado delicados. Si su diámetro o su quiralidad (el ángulo que conforman los átomos en la estructura enrollada) varían lo más mínimo, la banda prohibida puede desaparecer. Además, los ingenieros han de componérselas para colocar miles de millones de ellos en hileras ordenadas y separadas por pocos nanómetros. «Para que los nanotubos de carbono se convirtiesen en sucesores dignos del silicio, tendríamos que resolver todas estas cuestiones en los próximos dos o tres años», sentencia Guha.

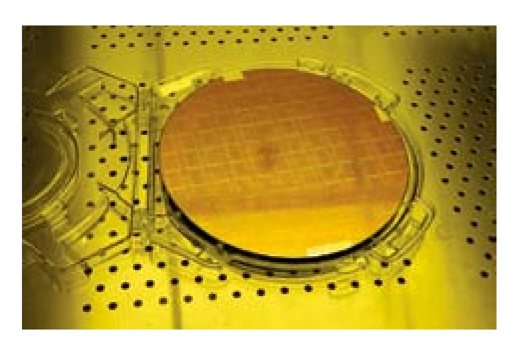
MÁS ALLÁ DE LA BARRERA DE MEMORIA

«¿Cuál es el inmueble más caro del planeta?», pregunta Andrew Wheeler. «Este de aquí», se responde señalando una caja dibujada en una pizarra que representa la matriz de un microchip. Con unos tejanos y una camisa de cuadros, Wheeler parece más un vaquero que el director adjunto de HP Labs, la división de investigación de Hewlett-Packard. Explica que la mayoría de los transistores que ocupan ese prohibitivo espacio no se emplean para calcular; forman una «memoria caché», o memoria de acceso aleatorio estática (SRAM). Su función consiste en almacenar instrucciones a las que se accede con frecuencia: el equivalente en silicio del *dock*, o barra de accesos directos, de un Mac, donde se guardan los elementos más usados para evitar tener que buscarlos una y otra vez. Wheeler quiere que desaparezca. Pero, a corto plazo, se conformará con deshacerse de la memoria principal y el disco duro.

Según HP, esos tres elementos, conocidos como «jerarquía de memorias» (con la SRAM en la cima, la memoria principal en el medio y disco duro en la base), causan la mayoría de los problemas. Sin una memoria de gran capacidad y alta velocidad que almacene y despache bits a la mayor celeridad posible, un procesador más rápido no servirá de mucho.

Para derribar esta «barrera de memoria», el equipo de Wheeler en Palo Alto, California, ha trabajado en el diseño de una nueva clase de ordenador, La Máquina, que prescinde de la jerarquía de memorias y unifica sus niveles. Cada escalón de la jerarquía actual tiene sus ventajas y sus inconvenientes. La SRAM funciona extremadamente rápido (para seguir el ritmo a la CPU), pero consume demasiada energía y adolece de baja capacidad. La memoria principal, o memoria de acceso aleatorio dinámica (DRAM), es bastante rápida, densa y duradera, ya que se trata de la herramienta empleada para ejecutar las aplicaciones activas. Sin embargo, un corte de corriente hará que todo lo almacenado en ella desaparezca. Por esa razón, se necesitan medios de almacenamiento no volátiles, como discos duros y memorias *flash*, que guardan los datos cuando el equipo se apaga. Estos ofrecen una alta capacidad y un bajo consumo de energía, pero resultan terriblemente lentos; además, las memorias *flash* se deterioran con relativa rapidez. Dado que los compromisos a los que llega cada subsistema se solapan, los ordenadores modernos los vinculan para que las CPU muevan datos entre ellos de la manera más eficiente posible. «Como producto de ingeniería es una maravilla», comenta Wheeler, «pero también un desperdicio enorme».

Una memoria universal que combine la velocidad de la SRAM, la durabilidad de la DRAM y la capacidad y eficiencia energética del almacenamiento *flash* ha sido el santo grial de ingenieros, diseñadores y programadores desde hace décadas, añade Wheeler. Para satisfacer los dos últimos requerimientos, La Máquina explota un nuevo componente electrónico: el memristor. El término proviene de *memory resistor*, o «resistencia con memoria», debido a que su facultad para conducir la electricidad depende de la corriente que haya circulado anteriormente por él. Predicho matemáticamente en 1971, durante largo tiempo se creyó que sería imposible construir uno. En 2008, HP anunció que había logrado fabricar un memristor operativo. El programa de investigación se aceleró y se convirtió en el precursor de La Máquina.



NUEVA ARQUITECTURA: El chip TrueNorth imita las columnas corticales del cerebro de los mamíferos. Dharmendra Modha, de IBM, intenta construir chips cognitivos que sean al menos tan «inteligentes» como una mosca.

CORTESÍA DE IBM (*TrueNorth*)

La aplicación de un voltaje a un memristor modifica su estado de conducción, lo que permite crear la distinción entre 0 y 1 necesaria para almacenar datos digitales. Al igual que en una memoria *flash*, dicho estado persiste cuando se corta la corriente. Y, como en una DRAM, resulta posible leer y escribir datos a gran velocidad aun cuando las celdas se encuentren densamente empaquetadas. Sin embargo, para conseguir un rendimiento similar al que ofrece la SRAM, los memristores tendrían que ubicarse junto a la CPU, en el mismo molde de silicio, una disposición poco práctica con la tecnología actual. Por ello, HP planea recurrir a la fotónica (enviar los bits con pulsos láser en vez de con una corriente eléctrica) para conectar los memristores con los cachés SRAM estándar de los procesadores lógicos. No es exactamente una memoria universal, pero sí reduce la jerarquía de memorias de tres niveles a dos.

Al combinar RAM y almacenamiento no volátil, una arquitectura basada en memristores permitiría aumentar el rendimiento de cómputo sin recurrir a una miniaturización como la anunciada por Moore. El superordenador Watson de IBM, que en 2011 derrotó a oponentes humanos en el concurso televisivo *Jeopardy*, necesitó 16 teraoctetos de DRAM alojados en 10 bastidores de servidores Linux que engullían una gran cantidad de energía. La misma capacidad de memoria *flash* no volátil cabría en una caja de zapatos y consumiría lo que un ordenador portátil medio. Una arquitectura de memoria que fusionara ambas funciones permitiría mantener enormes conjuntos de datos en la memoria activa y procesarlos en tiempo real, en vez de trocearlos en bloques secuenciales menores. Además, reduciría de manera considerable el coste energético.

Wheeler sostiene que, a medida que más aparatos se unan al «Internet de las cosas», la transmisión de petaoctetos de información a y desde los centros de datos hará que la ley de Moore se torne irrelevante. Pero, si una memoria universal permite disponer de una capacidad equiparable a la de un superordenador en equipos más pequeños y eficientes, la información podría almacenarse y preprocesarse en los propios dispositivos. Tal vez los componentes de silicio de la CPU nunca alcancen tamaños inferiores a los siete nanómetros ni velocidades superiores a 4 GHz. Pero, una vez derribada la barrera de la memoria, puede que eso ya no importe.

Nuestra visión de los ordenadores está evolucionando. Ya no queremos «máquinas pensantes» como las vaticinadas por los escritores de ciencia ficción, sino aplicaciones como Google Now

MÁS ALLÁ DE VON NEUMANN

Pero, aunque HP logre desarrollar una memoria universal, los ordenadores seguirán siendo lo que siempre han sido desde que en 1946 se construyó ENIAC, la primera computadora de propósito general: calculadoras numéricas extremadamente rápidas. Su diseño básico, formalizado por el matemático John von Neumann en 1945, incluye una unidad de procesamiento que ejecuta instrucciones, un banco de memoria que almacena esas instrucciones y los datos sobre los que estas han de operar, y una conexión, o «bus», que enlaza ambos elementos. La arquitectura de Von Neumann está optimizada para ejecutar una secuencia lineal de instrucciones simbólicas; es decir, para hacer aritmética. Las primeras «computadoras» eran seres humanos a los que se les pagaba por sentarse en una sala y efectuar cálculos a mano, por lo que no resulta sorprendente que los ordenadores electrónicos se diseñaran para automatizar ese proceso, tedioso y propenso a errores.

Sin embargo, los ordenadores se enfrentan cada vez más a tareas que no pueden ejecutarse mediante una secuencia lineal de instrucciones, como reconocer objetos en grabaciones de vídeo o guiar robots por terrenos peligrosos. Tales cometidos guardan más relación con las facultades de un cerebro biológico que con las calculadoras mecánicas. Los seres vivos han de extraer información de un entorno dinámico y procesarla en tiempo real. Si el cerebro de una mosca tuviese que transferir una a una las instrucciones entre un módulo de memoria y otro de procesamiento, el animal jamás evitaría que lo aplastasen.

Dharmendra Modha, fundador del grupo de computación cognitiva de IBM, intenta construir chips que sean al menos tan «inteligentes» como una mosca y que gocen de su misma eficiencia energética. Según explica, la clave radica en abandonar la arquitectura de Von Neumann. Su equipo se ha propuesto imitar las columnas corticales del cerebro de los mamíferos, las cuales procesan, transmiten y almacenan información en la misma estructura, lo que evita el cuello de botella causado por la conexión. Hace poco, IBM dio a conocer el chip TrueNorth, compuesto por más de 5000 millones de transistores organizados en 4096 núcleos neurosinápticos que remedan un millón de neuronas y 256 millones de conexiones sinápticas. Con el consumo energético de un puntero láser, el dispositivo consigue un alto rendimiento en la búsqueda de patrones en tiempo real.

Modha señala un monitor situado en el rincón de la sala de demostraciones del Centro de Investigación Almaden de IBM en San José, en California. La escena parece la grabación de una cámara de vídeo que necesita con urgencia un reinicio: coches, peatones y una o dos bicicletas se ven congelados en una rotonda. Uno de los viandantes ha sido marcado con un rectángulo rojo superpuesto en la imagen. Al cabo de un minuto, los vehículos, la gente y las bicicletas aparecen en otra escena estática, como si la grabación hubiera dado un salto hacia delante. «No se trata de fotografías», explica Modha, «sino de una transmisión de vídeo del campus de Stanford analizada con un ordenador portátil que simula un chip TrueNorth. Lo que ocurre es que la simulación procede mil veces más despacio». En aquel momento, el chip TrueNorth que debía emplearse en dicho análisis se estaba usando en otra sala. Modha añade que, de poder utilizarlo, el vídeo se reproduciría en tiempo real y los rectángulos rojos seguirían con fluidez a los peatones.

Al igual que la arquitectura de von Neumann, los dispositivos neurosinápticos como TrueNorth adolecen de sus propios puntos débiles. «No convendría ejecutar iOS con este chip», advierte Modha. «Puede hacerse, pero sería tan ineficiente como el portátil a la hora de procesar la transmisión de vídeo.» IBM se ha propuesto aprovechar ambas arquitecturas para crear lo que describe como un sistema informático «holístico».

En el caso de chips como TrueNorth, la ley de Moore clásica aún reviste importancia. El equipo de Modha ya ha colocado 16 de ellos en una placa. Y, para finales de este año, los investigadores esperan poder apilar ocho placas en un dispositivo de cien vatios y el tamaño de una tostadora, cuya potencia computacional requeriría un centro de datos entero para simularla.

En otras palabras, el silicio y el número de transistores aún cuentan, pero lo más importante es cómo se dispongan. «Al reubicar los ladrillos, se consigue un edificio con una funcionalidad muy diferente», explica Modha. «Muchos creen, y nosotros también lo creíamos al principio, que hay una necesidad real de cambiar de tecnología para seguir aumentando el rendimiento computacional. Y aunque está claro que una nueva técnica puede resultar beneficiosa, una arquitectura original puede incrementar el rendimiento en varios órdenes de magnitud.»

LEYES DE MOORE

De vuelta a Hillsboro, Michael C. Mayberry, director de investigación de componentes de Intel, echa abajo otro mito sobre la ley de Moore: en realidad, nunca se trató de transistores. «El objetivo consiste en reducir el coste por función», asegura. Ya se mida en número de transistores por centímetro cuadrado de silicio, en líneas de código ejecutadas por segundo o en rendimiento por vatio de potencia, lo único importante es efectuar más tareas con menos recursos. No ha de extrañar que, en su propio sitio web, Intel describa la ley de Moore no como una tendencia tecnológica o como una fuerza de la naturaleza, sino como un modelo de negocio.

«Cuando alguien me pregunta qué aspecto de la ley de Moore me quita el sueño, yo respondo que duermo muy bien», afirma Mayberry. «Que la ley de Dennard llegara a su fin no hizo que nos detuviéramos; simplemente nos adaptamos. Si pensamos a quince años vista, cabe esperar cambios, pero eso no significa que vayamos a detenernos.» Intel, IBM y HP coinciden en que el futuro del rendimiento computacional dejará de parecerse a una curva y, en su lugar, adoptará una forma más ramificada, reminiscente de la evolución biológica.

Ello se debe a que nuestra visión de los ordenadores también está evolucionando. Ya no buscamos «máquinas pensantes» autónomas, de tipo oráculo, como las vaticinadas por los escritores de ciencia ficción de finales del siglo xx. Lo que de verdad está muriendo no es la ley de Moore, sino la era de los ordenadores de propósito general que la ley de Moore hizo posibles.

A medida que la ley de Moore se ramifique en leyes de Moore, la búsqueda de un menor coste por función se logrará mediante la llamada «computación heterogénea». Compañías como IBM, Intel, HP y otras no solo integrarán circuitos, sino sistemas enteros que puedan manejar la creciente demanda de tareas computacionales de distinta índole. Bernard S. Meyerson, de IBM, sostiene que la gente compra funciones, no chips. Y que, de hecho, cada día tiene menos interés por adquirir ordenadores. Queremos que nuestras herramientas procesen, o «piensen», de un modo que nos sea útil allí donde las necesitamos. En vez de HAL, el ordenador superinteligente de *2001: Una odisea en el espacio*, tenemos Google Now, que nos dice cuándo debemos salir hacia el aeropuerto para tomar nuestro avión.

Futuristas como Nick Bostrom, autor de *Superintelligence: Paths, dangers, strategies*, auguran que la ley de Moore provocará que la inteligencia artificial generalizada despegue y se fusione en una especie de ser digital omnipotente que todo lo sabe. Sin embargo, la computación heterogénea sugiere que lo más probable es que la computación se disemine entre objetos y sistemas que considerábamos «tontos» (automóviles, enrutadores, equipos de diagnóstico médico y cadenas de distribución) y los dote de la flexibilidad semiautónoma y la competencia específica de los animales domésticos. En otras palabras, en un mundo posterior a la ley de Moore, los ordenadores no se convertirán en dioses. Más bien, se comportarán como perros muy inteligentes. Y de igual forma que un gran danés no está hecho para hacer el trabajo de un terrier, un procesador gráfico no está construido para efectuar las tareas de una CPU.

Wheeler, de HP, pone el ejemplo de múltiples núcleos de procesamiento específicos acoplados a una memoria universal de varios petaoctetos: un híbrido de superprocesador y memoria masiva, el cual funcionaría de manera muy similar a los aceleradores gráficos y los cachés de memoria que hoy se disponen junto a los recursos centralizados de una CPU. Modha, de IBM, prevé dispositivos del tamaño de una pelota de golf que constarán de chips cognitivos unidos a cámaras baratas y que podrán lanzarse en regiones azotadas por desastres naturales para localizar algo tan concreto como niños heridos. Y Leon Chua, teórico de la computación de la Universidad de California en Berkeley que en 1971 predijo la existencia del memristor, opina que los esfuerzos de HP para acabar con la jerarquía de memorias y la investigación de IBM para rediseñar la CPU no son más que respuestas complementarias a lo que él denomina el «gran cuello de botella de los datos».

«Es increíble que los ordenadores que llevamos usando cuarenta años sigan basándose en la misma idea», asegura Chua, refiriéndose a la arquitectura de tipo calculadora de Von Neumann. Opina que la transición a la computación heterogénea resultará inevitable y que creará una economía completamente nueva; sobre todo, porque la computación posterior a la ley de Moore y a la arquitectura de Von Neumann requerirá nuevos métodos de programación y de diseño de sistemas. El investigador cree que, puesto que una gran parte de la ciencia informática moderna, la ingeniería y el diseño de chips se dedica a enmascarar las limitaciones que la jerarquía de memorias y la arquitectura de Von Neumann imponen sobre los ordenadores, una vez que se eliminen dichas deficiencias «todos los programadores informáticos tendrán que volver a clase».

Lo que Chua, Modha y Wheeler no mencionan nunca en sus visiones del futuro son los transistores ni el aumento de sus capacidades. Según Meyerson, de IBM, lo que la ley de Moore ha descrito con precisión durante medio siglo —una pulcra relación entre el aumento en la densidad de transistores y el descenso en el coste por función— quizá no sea más que una coincidencia. «Al observar los últimos cuarenta años de semiconductores, vemos latidos muy constantes», observa Meyerson. «No es que el progreso vaya a detenerse, lo que ocurre es que esta tecnología sufre arritmia.»

PARA SABER MÁS

Cramming more components onto integrated circuits. Gordon E. Moore en *Electronics*, vol. 38, n.º 8, págs. 114-117, abril de 1965.

Memristor: The missing circuit element. Leon O. Chua en *IEEE Transactions on Circuit Theory*, vol. 18, n.º 5, págs. 507-519, septiembre de 1971.

Design of ion-implanted MOSFET's with very small physical dimensions. Robert H. Dennard et al. en *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol. 9, n.º 5, págs. 256-268, octubre de 1974.

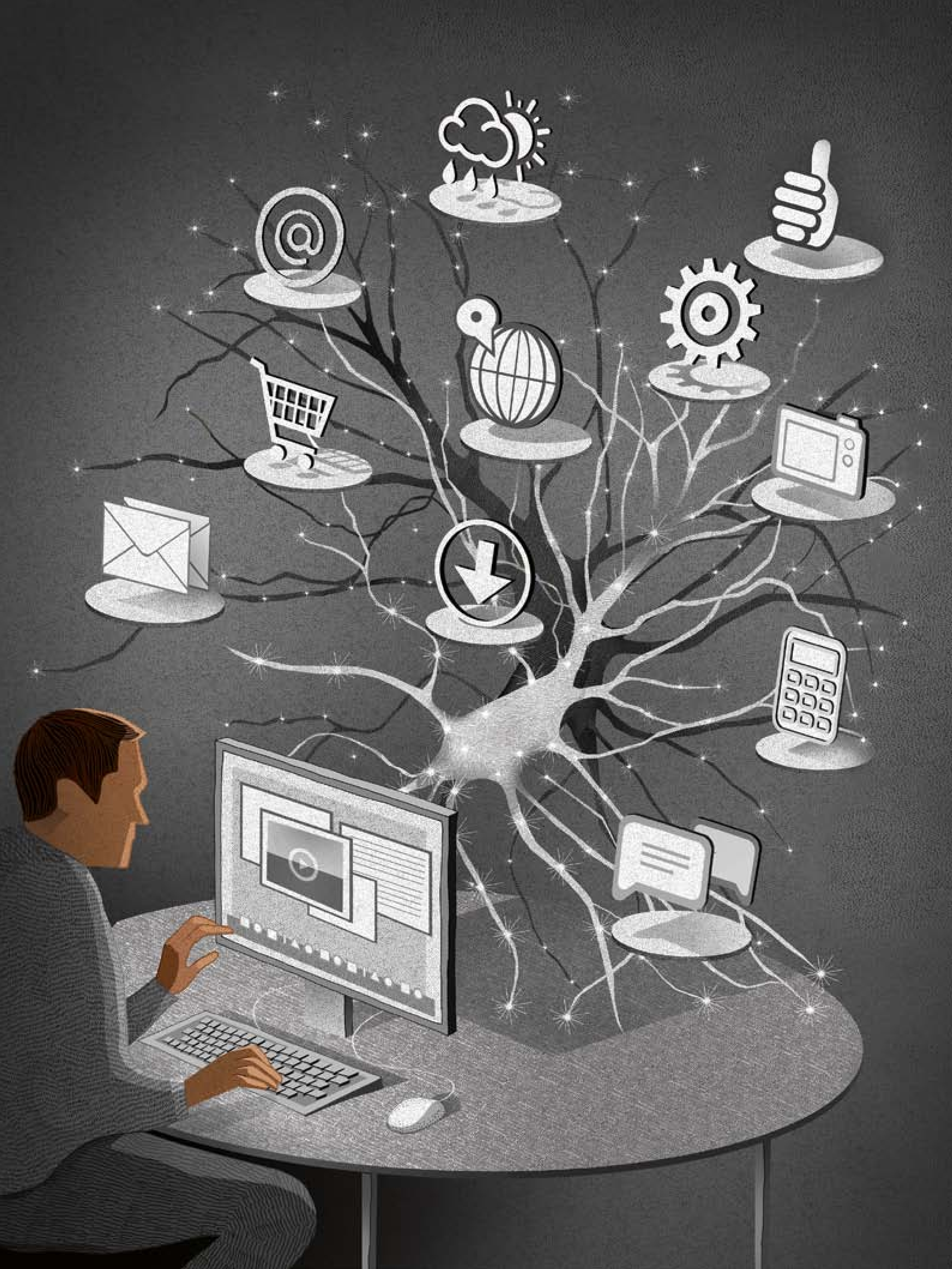
Carbon nanotubes: The route toward applications. Ray H. Baughman et al. en *Science*, vol. 297, págs. 787-792, agosto de 2002.

EN NUESTRO ARCHIVO

Microchips del futuro inmediato. La redacción. *IyC*, marzo de 2010.

Memorias del futuro. Luca Perniola en *IyC*, enero de 2014.

Electrónica con pulsos de luz. Martin Schultze y Ferenc Krausz en *IyC*, mayo de 2015.



INFORMÁTICA

El alba de la memcomputación

Una nueva clase de componentes electrónicos, más próximos a las neuronas que a los transistores, auguran un tratamiento de la información mucho más rápido y eficiente

Massimiliano Di Ventra y Yuriy V. Pershin

EN SÍNTESIS

Todos los ordenadores modernos emplean una unidad que efectúa los cálculos y otra de memoria que almacena programas y datos. Transferir la información de una a otra consume mucho tiempo y energía.

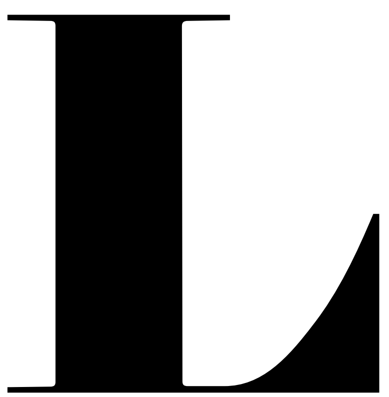
Una nueva técnica, la memcomputación, se basa en componentes electrónicos que constituyen al mismo tiempo unidades de memoria y de procesamiento. En nuestro cerebro, las neuronas funcionan de modo similar.

Aunque los elementos básicos ya existen, aún no se ha construido ningún memcomputador completo. Su desarrollo supondría un paso de gigante en la velocidad y la eficiencia energética del tratamiento de la información.

ADAM SIMPSON

Massimiliano Di Ventra es catedrático en el departamento de física de la Universidad de California en San Diego.

Yuriy V. Pershin enseña en el departamento de física y astronomía de la Universidad de Carolina del Sur.



LAS PALABRAS QUE ESTÁ LEYENDO EN ESTOS MOMENTOS HAN SIDO ESCRITAS en los mejores ordenadores que ofrece la tecnología actual: equipos que malgastan una enorme cantidad de energía y que necesitan ingentes cantidades de tiempo para ejecutar importantes cálculos científicos. Se trata de un aspecto común a todos los ordenadores que existen hoy, desde los incluidos en los teléfonos inteligentes hasta las grandes supercomputadoras de millones de dólares que zumban en los centros de cálculo más avanzados del mundo.

Este artículo fue redactado en Word, un buen programa que seguramente usted también haya usado. Para escribir «Las palabras que está leyendo en estos momentos», nuestro ordenador tuvo que transferir una secuencia de ceros y unos (la representación en código máquina de un documento de Word) desde un área de memoria temporal hasta otra ubicación física, la unidad central de procesamiento (CPU). Después, la CPU convirtió esos datos en letras visibles en la pantalla. Para evitar que la frase se volatilizara al apagar el ordenador, los datos que la representaban hubieron de viajar de nuevo por un manojo de cables hasta un área de memoria más estable, como un disco duro.

Ese ir y venir de información se debe a que, hoy por hoy, los dispositivos de memoria no pueden procesar datos y los procesadores no pueden almacenarlos. Semejante división del trabajo tiene lugar incluso en los equipos más rápidos disponibles hoy en día, aquellos que, con múltiples procesadores, son capaces de ejecutar cálculos mediante computación en paralelo. El problema reside en que cada uno de sus procesadores adolece de la misma limitación.

Durante los últimos años, los expertos han desarrollado un método para combinar lo que antes parecía irreconciliable. Como resultado, han conseguido crear circuitos que manipulan números y, al mismo tiempo, funcionan como unidades de memoria. Ello implica reemplazar los componentes electrónicos tradicionales, como transistores, condensadores e inductores (bobinas), por otros denominados *memristores*, *memcondensadores* y *meminductores*. Ya existen prototipos experimentales que pronto podrán combinarse en un nuevo tipo de máquina: la *memcomputadora*.

Las memcomputadoras alcanzarían una velocidad sin precedentes gracias a sus capacidades duales. Cada parte del equipo puede contribuir a solucionar un problema, lo que supone una versión nueva y más eficiente de la actual computación en paralelo. Y, puesto que la memoria del ordenador puede tanto resolver un cálculo como almacenar su solución, el proceso ahorra toda la energía que hoy se gasta en transferir los datos desde una ubicación física del equipo a otra. Esta nueva arquitectura cambiaría el modo de operar de los ordenadores de cualquier tipo, de los minúsculos chips de nuestro teléfono a los grandes superordenadores. De hecho, se trata de un diseño que imita mucho mejor el funcionamiento de nuestro cerebro, que emplea las mismas neuronas para guardar recuerdos y para procesar la información.

Estas nuevas máquinas podrían tardar segundos en efectuar cálculos que a los ordenadores actuales les llevarían décadas. También serían menores y consumirían mucha menos electricidad. Aún no se ha construido ningún memcomputador completo, pero los experimentos con los nuevos componentes electrónicos apuntan a un impacto enorme en el diseño de ordenadores, la sostenibilidad global, el ahorro energético y la capacidad para resolver problemas científicos de primer orden.

UN CEREBRO ELECTRÓNICO

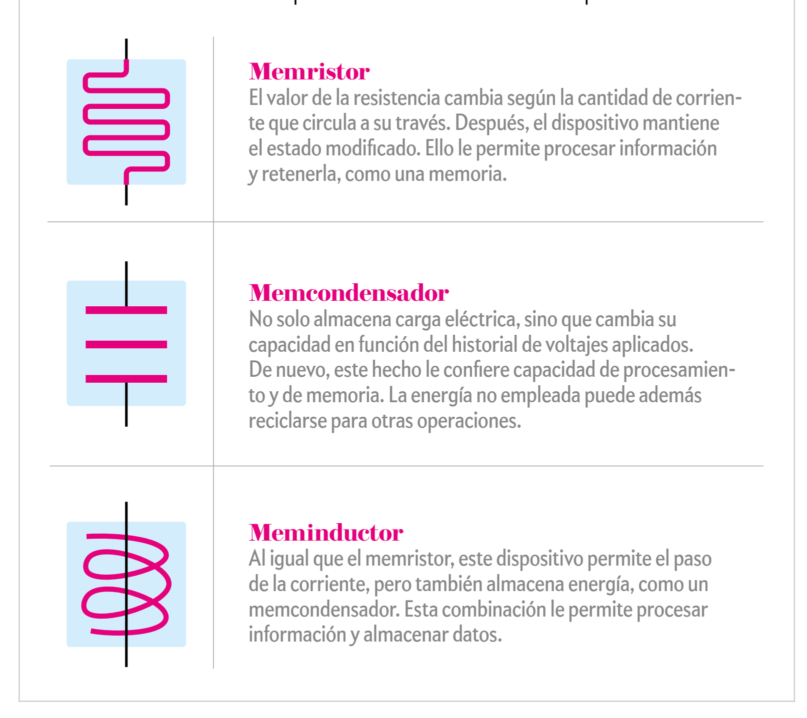
Hoy se requiere una ínfima cantidad de energía y una fracción de segundo para transferir datos como nuestra frase de Word entre las partes de un equipo. Sin embargo, si tenemos en cuenta que dicha energía debe multiplicarse por el número de operaciones informáticas similares que se llevan cabo en todo el mundo, obtendremos un resultado enorme.

Entre 2011 y 2012, las necesidades energéticas de los centros de computación de todo el planeta crecieron en un pasmoso 58 por ciento. A ello hemos de sumar todos los aparatos domésticos que hoy incorporan alguna capacidad de computación, desde hornos y televisores hasta ordenadores portátiles. Combinados, los sectores de la información y la comunicación dan cuenta del 15 por ciento del consumo eléctrico mundial. Para 2030, el gasto energético global en electrónica de consumo igualará la demanda residencial actual de Estados Unidos y Japón juntos, con un coste anual de 200.000 millones de dólares. Semejante acaparamiento de energía no es sostenible.

COMPONENTES

Las tres piezas básicas de un memcomputador

Los circuitos actuales emplean tres componentes básicos que responden a las señales eléctricas. Las resistencias se oponen al paso de la corriente, los condensadores almacenan carga eléctrica y los inductores convierten la corriente en un campo magnético. (Un ordenador suele emplear transistores en lugar de resistencias.) Cuando el suministro eléctrico se interrumpe, los componentes tradicionales vuelven a su estado original. En cambio, las versiones con memoria de estos elementos conservan su estado modificado. Ese «recuerdo» les permite calcular mucho más rápido.



El problema no puede solucionarse reduciendo aún más el tamaño de los transistores, el elemento básico de la electrónica digital. La Hoja de Ruta Internacional para la Tecnología de Semiconductores (una serie de documentos elaborados por expertos de la industria) prevé que, para 2016, la fabricación de transistores se topará con una barrera, ya que los dispositivos disponibles no podrán seguir miniaturizándose sin comprometer algunas de sus cualidades.

Ciertas investigaciones científicas también se toparán con sus propias barreras. Algunos problemas que solo pueden abordarse con grandes sistemas de cómputo, como la predicción de pautas meteorológicas globales o la previsión de enfermedades en una población mediante la exploración de enormes bases de datos genéticas, requerirán cada vez más potencia de cálculo. Los memcomputadores, al sortear la continua transferencia de datos entre la CPU y las unidades de memoria, permitirían ahorrar grandes cantidades de tiempo y energía.

Las memcomputadoras no son el primer sistema capaz de procesar y almacenar información al mismo tiempo. Nuestro cerebro hace exactamente lo mismo. Por esa razón, la memcomputación se inspira en ese rápido y eficiente órgano que se aloja en nuestro cráneo.

Según varias estimaciones, el cerebro humano es capaz de efectuar unos 10.000 billones (10^{16}) de operaciones por segundo, algo para lo que se basta con una potencia de entre 10 y 24 vatios. Un superordenador necesitaría consumir 10 millones de veces más para soportar la misma carga de trabajo. Además, las computadoras actuales se encuentran aún muy lejos de ejecutar algunas tareas complejas, como el reconocimiento de patrones (por ejemplo, separar el ladrido de un perro del ruido de un coche que pasa por la calle), algo que nuestro cerebro logra sin mayores problemas. A diferencia de los mejores superordenadores disponibles en la actualidad, el cerebro no lleva a cabo los cálculos en lugares distintos, sino que estos tienen lugar en las mismas neuronas y sinapsis. Al disminuir la transferencia de información de un sitio a otro, se logra un menor gasto de energía y de tiempo. Un ordenador puede realizar cálculos, uno a uno, más rápido que el ser humano. Pero para ello necesita toda la fuerza bruta de los transistores.

Desde sus inicios, los ordenadores han dependido de esa separación de tareas para evitar que programas y datos interfieran durante el procesamiento. Los cambios físicos que provoca en un circuito la introducción de nuevos datos (por ejemplo, las letras que escribimos en Word) modificarían y corromperían el programa o los datos. Sin embargo, esto se evitaría si los elementos del circuito pudieran «recordar» la última acción realizada incluso después de cortar el suministro de electricidad. En tal caso, los datos permanecerían intactos.

TRES NUEVOS COMPONENTES

Los componentes electrónicos en los que se basa la memcomputación pueden hacer exactamente eso: procesar información y almacenarla después de que se interrumpa la corriente. Uno de los nuevos elementos es el memristor. Para entender su funcionamiento, imaginemos una tubería cuyo diámetro cambiase en función del sentido en que fluye el agua. Si esta corre de derecha a izquierda, la tubería se ensancha y permite un mayor caudal. Si el agua fluye en sentido opuesto, se estrecha. Una vez que el flujo se detiene, la tubería conserva el diámetro más reciente. En ese sentido, «recuerda» la cantidad de agua que fluyó a través de ella.

Ahora sustituyamos el agua por una corriente eléctrica y la tubería por un memristor. Del mismo modo que la tubería modificaba su diámetro, el memristor cambia su resistencia en función de la cantidad de electricidad que fluye a su través. El equivalente a una tubería más ancha ofrece una menor resistencia eléctrica, y viceversa. Si consideramos la resistencia como un número y su variación como un proceso de cálculo, vemos que un memristor puede procesar información, almacenarla y conservarla aun después de que se haya interrumpido la corriente.

La idea de memristor se debe a Leon O. Chua, ingeniero eléctrico de la Universidad de California en Berkeley, quien la propuso en los años setenta. Por aquella época, sin embargo, su teoría no tenía visos de resultar práctica. Los materiales empleados para construir los circuitos no retenían recuerdos de su último estado, como nuestra tubería de agua imaginaria. Pero

esa situación ha ido cambiando a lo largo de las últimas décadas. En 2008, Stanley Williams, ingeniero de Hewlett-Packard, y sus colaboradores fabricaron unidades de memoria que podían variar su resistencia y conservar dicha modificación. Para ello, emplearon componentes de dióxido de titanio con una anchura de unas decenas de nanómetros (milmillonésimas de metro). Según explicaron en un artículo publicado en *Nature*, el dispositivo conservaba un estado que quedaba determinado por el historial de corrientes que hubiesen circulado a su través. La tubería imaginaria se había hecho realidad.

Hoy tales componentes pueden fabricarse con una amplia variedad de materiales. Su diámetro apenas alcanza unos pocos nanómetros, lo que posibilita incorporarlos en casi cualquier clase de aparato. Muchos de ellos pueden fabricarse en las mismas instalaciones de semiconductores que hoy elaboran componentes electrónicos, lo que permite producirlos a escala industrial.

Otro componente clave en esta nueva técnica de computación es el memcondensador. Un condensador normal almacena carga eléctrica, pero su estado (su capacidad) permanece invariante con independencia de la cantidad de carga que se haya depositado en él. En los ordenadores actuales, los condensadores se usan sobre todo en las memorias dinámicas de acceso aleatorio (DRAM), que guardan programas informáticos para que el procesador acceda rápidamente a ellos cuando los necesite. Un memcondensador, en cambio, no solo almacena carga eléctrica, sino que modifica su capacidad en función del historial de voltajes, lo que le confiere características de memoria y de unidad de procesamiento. Más aún, puesto que los memcondensadores almacenan carga, la energía asociada puede reciclarse durante el proceso de cómputo, lo que ayuda a reducir el consumo total del equipo. (Los memristores, por el contrario, hacen uso de toda la energía que se les suministra.)

Algunos tipos de memcondensadores, fabricados con materiales ferroeléctricos relativamente caros, ya se encuentran disponibles en el mercado y se usan como dispositivos de almacenamiento de datos. Sin embargo, varios laboratorios están desarrollando versiones de silicio, más barato, lo que ofrece unos costes de producción lo suficientemente bajos para incorporarlos en un ordenador.

El tercer elemento de la memcomputación es el meminductor. Se trata de un dispositivo con dos terminales y que puede almacenar energía, al igual que un memcondensador, pero que también deja pasar la corriente, como un memristor. Aunque ya existen meminductores, estos ocupan un gran volumen, puesto que se basan en abultadas bobinas magnéticas de alambre, lo que impide usarlos en ordenadores pequeños. No obstante, y al igual que ocurrió con los memristores hace unos años, los avances en tecnología de materiales podrían cambiar las reglas del juego en un futuro próximo.

UNA NUEVA ARQUITECTURA

En 2010 nos propusimos demostrar que una memcomputadora podría realizar cálculos mejor que los ordenadores actuales. A tal fin, consideramos el problema de hallar la salida de un laberinto, una clase de cálculo empleada desde hace tiempo en informática para evaluar la eficiencia del soporte físico de un ordenador. Los algoritmos tradicionales exploran el laberinto mediante pasos cortos consecutivos. Uno de métodos más conocidos es el «seguidor de paredes». En él, el programa recorre la pared del laberinto por todos sus recodos y vueltas, evita los espacios muertos en los que la senda termina, y prosigue, paso a paso, hasta dar con la salida. Este método es lento.

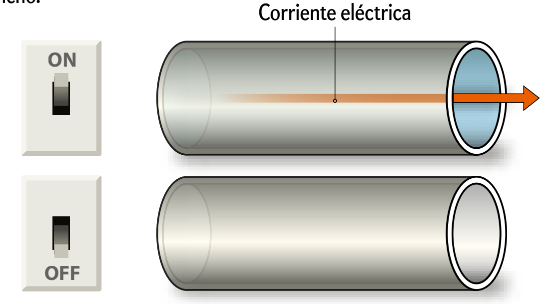
ASÍ FUNCIONA

Memristores

Uno de los componentes fundamentales de la memcomputación, el memristor, responde de forma distinta a la cantidad de corriente eléctrica que circule a su través. A continuación se muestran tres cambios que, una vez quedan retenidos en el dispositivo, forman la base de la memoria.

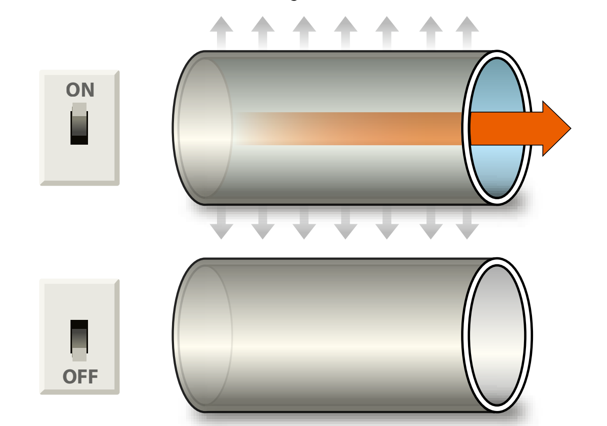
Resistencia típica

Cuando una corriente eléctrica débil pasa a través de un memristor, el dispositivo opone un nivel de resistencia especificado. Dicho nivel queda aquí representado por el ancho del tubo. En un ordenador, el valor de la resistencia puede interpretarse como un número con el que se puede calcular. Cuando la corriente se interrumpe, el tubo conserva el mismo ancho.



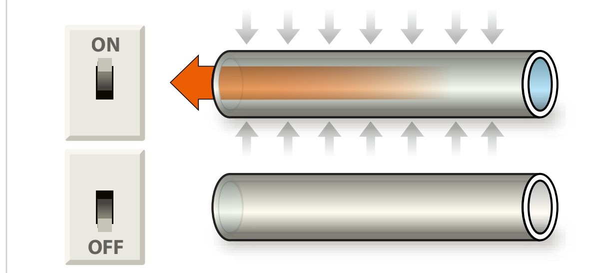
Resistencia baja

Cuando por el memristor circula una corriente intensa, el dispositivo disminuye su resistencia, mostrada aquí como un tubo más ancho. Ese cambio modifica el número asociado al dispositivo, lo que implica el procesamiento de la información. Si la electricidad deja de fluir, el memristor conserva su resistencia, lo que le permite almacenar el número procesado. Una resistencia tradicional regresaría a su estado inicial.



Resistencia elevada (inversión de la corriente)

Los memristores también pueden aumentar su resistencia si se invierte el sentido de la corriente que pasa a través de ellos. Ese cambio se representa mediante un tubo más estrecho. Una vez más, el tubo no recupera su estado inicial cuando se interrumpe la corriente, lo que añade memoria a la capacidad de procesamiento.



JEN CHRISTIANSEN

Nuestras simulaciones demostraron que un memcomputador resolvería el problema con gran rapidez. Consideremos una red de memristores, uno en cada recodo del laberinto, todos ellos en un estado de resistencia elevada. Si aplicamos un voltaje entre la entrada y salida, la corriente circulará solo a través del camino correcto, ya que se verá bloqueada por los callejones sin salida de las demás rutas. Al circular la corriente, las resistencias de los memristores asociados a dicho camino se modificarán. Una vez que el voltaje desaparezca, la solución quedará almacenada únicamente en las resistencias de aquellos dispositivos cuyo estado había cambiado. De esta manera, habremos resuelto el problema y almacenado la solución en un solo paso. Todos los memristores calculan la solución en paralelo, al mismo tiempo.

Un proceso como el descrito difiere por completo de la manera en que procede la computación en paralelo actual. En una caso típico, un gran número de procesadores ejecutan las diferentes partes de un programa y luego se comunican entre sí para obtener la solución final. Este proceso aún requiere mucho tiempo y energía para transferir la información entre todos los procesadores y unidades de memoria asociadas, ya que estos se encuentran separados físicamente.

La memcomputación revela todo su potencial cuando se aplica a uno de los problemas computacionales más difíciles conocidos: calcular todas las propiedades de una larga serie de números enteros. Se trata del tipo de reto al que se enfrenta un ordenador cuando intenta descifrar códigos complejos. Por ejemplo, introduzcamos 100 números enteros y pidamos al ordenador que encuentre un subconjunto cuyos elementos sumen cero. La máquina deberá considerar todos los subconjuntos posibles y sumar cada secuencia de números. Esa estrategia implica que el tiempo de cómputo aumenta de manera exponencial con la longitud de la serie inicial. Si para examinar 10 enteros se requiere un segundo, para hacer lo propio con 100 necesitaríamos 10^{27} segundos: treinta trillones de años.

Al igual que en el problema del laberinto, un memcomputador puede calcular todos los subconjuntos y sumas en un solo paso. Se trata de un verdadero proceso en paralelo, ya que la máquina no tiene que enviar una y otra vez los resultados parciales a un procesador (o un conjunto de ellos) en una serie secuencial de pasos. De esta manera, nuestro problema quedaría resuelto en un segundo.

A pesar de que los componentes básicos ya se han fabricado en el laboratorio, aún no disponemos de chips de memcomputación comerciales. Por el momento se están evaluando prototipos en instituciones académicas y por parte de algunos fabricantes a fin de comprobar si, tras un uso repetido, se muestran lo suficientemente robustos para reemplazar a los actuales microchips de memoria, como los que encontramos en los lápices USB y en las memorias de estado sólido. El proceso puede llevar tiempo, ya que tales componentes han de funcionar de manera fiable durante años.

Con todo, creemos que algunos diseños podrían estar listos en un futuro muy próximo. En 2013, junto con Fabio Lorenzo Traversa y Fabrizio Bonani, de la Universidad Politécnica de Turín, propusimos un dispositivo que llamamos «memoria dinámica de computación de acceso aleatorio» (DCRAM). Este intenta sustituir a la clase de memorias que, como mencionábamos más arriba, se emplean para guardar programas y datos justo antes de que un procesador los solicite. En ellas, cada uno de los bits de un programa queda representado por la carga almacenada en un condensador, lo que exige disponer de un gran número de estos componentes.

No obstante, si los sustituimos por memcondensadores, las distintas operaciones lógicas requeridas por el programa pueden representarse con un número menor de dispositivos. Un memcondensador puede pasar de una operación lógica a otra de manera casi instantánea al aplicarle un voltaje diferente. La ejecución de instrucciones como «hacer *a* Y *b*», «hacer *a* O *b*» y «SI NO hacer *z*» puede realizarse con solo dos memcondensadores en vez de con un gran número de transistores y condensadores normales fijos. No hace falta modificar la arquitectura física básica para llevar a cabo funciones distintas. En términos informáticos, la posibilidad de que un mismo elemento ejecute tareas distintas en función de la señal de entrada recibe el nombre de polimorfismo. Así ocurre con nuestro cerebro: su arquitectura no cambia a la hora de desempeñar una labor u otra. Y, como en todos los circuitos de memcomputación, dado que las operaciones se realizan en un área de memoria, se suprime la transferencia de datos hacia y desde un procesador físicamente separado, con el consiguiente ahorro de tiempo y energía.

Tales sistemas pueden fabricarse en las instalaciones ya existentes, ya que no se requiere un gran salto tecnológico. Lo que podría demorar su llegada sería la necesidad de diseñar el *software* apropiado. Aún no sabemos qué tipo de sistema operativo gestionará con mayor eficiencia los nuevos equipos. Primero tendremos que construirlos y, después, probar y optimizar diversos controladores. Se trata del mismo camino que hubieron de recorrer los ingenieros informáticos con los equipos actuales.

Otro objetivo deseable consistiría en hallar la mejor forma de integrar los nuevos elementos en los ordenadores tradicionales. En un mismo equipo, los procesadores actuales quizá podrían encargarse de las tareas sencillas —como procesar la frase de Word que daba comienzo a este artículo—, y los elementos de memcomputación, de las operaciones más complejas y costosas. Para ello habremos de construir, probar, reconstruir y volver a probar.

Resulta tentador especular con el futuro que nos depara esta nueva técnica. Tal vez llegue el día en que todos podamos disponer de un pequeño aparato, tan diminuto como para que quepa en la palma de la mano, capaz de resolver en pocos pasos y con un bajo consumo energético problemas complejos, como el reconocimiento de patrones o la modelización del clima terrestre a escalas finas. ¿No haría cola para conseguir uno?

PARA SABER MÁS

Missing link of electronics discovered: Memristor. J. R. Minkel en ScientificAmerican.com, 1 de mayo de 2008.

Putting memory into circuit elements: Memristors, memcapacitors, and meminductors. M. Di Ventra, Y. V. Pershin y L. O. Chua en *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, n.º 8, págs. 1371-1372, agosto de 2009.

Experimental demonstration of associative memory with memristive neural networks. Yuriy V. Pershin y Massimiliano Di Ventra en *Neural Networks*, vol. 23, n.º 7, págs. 881-886, septiembre de 2010.

Solving mazes with memristors: A massively parallel approach. Yuriy V. Pershin y Massimiliano Di Ventra en *Physical Review E*, vol. 84, n.º 4, art. n.º 046703, 14 de octubre de 2011.

The parallel approach. Massimiliano Di Ventra y Yuriy V. Pershin en *Nature Physics*, vol. 9, págs. 200-202, abril de 2013.

Dynamic computing random access memory. F. L. Traversa et al. en *Nanotechnology*, vol. 25, n.º 28, art. n.º 285201; julio de 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Microchips del futuro inmediato. La redacción. *IyC*, marzo de 2010.

Memorias del futuro. Luca Perniola en *IyC*, enero de 2014.

Cerebros de silicio. M. Mitchell Waldrop en *MyC* n.º 70, 2015.

por H. Joachim Schlichting



H. Joachim Schlichting ha sido director del Instituto para la Didáctica de la Física de la Universidad de Münster. En 2013 recibió el premio Arquímedes de Física.

El secreto de los castillos de arena

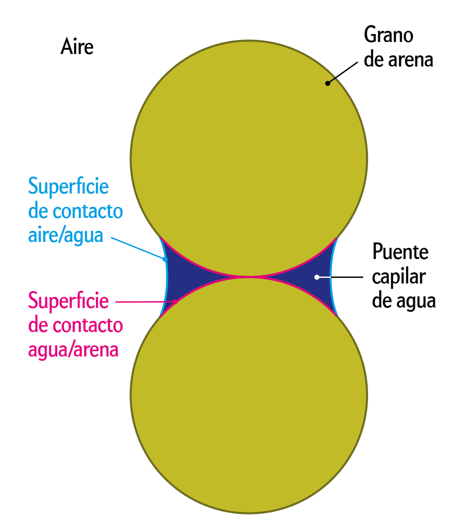
La razón por la que un castillo de arena no se desmorona reside en que su estabilidad apenas depende de la proporción exacta de agua y arena. Hasta hace poco, los científicos ignoraban por qué ocurre así

La arena resulta tan difícil de atrapar como un líquido. Si está seca, se nos escapa de las manos, forma dunas que avanzan como olas —aunque mucho más despacio— y, cuando se introduce en un recipiente, adopta la forma de este, tal y como haría un fluido. Sin embargo, al mínimo contacto con el agua, el ejemplo de líquido por excelencia, todo cambia. Una masa de arena mojada es mucho más que la suma de los fluidos que la componen: cesa de fluir y se deja modelar en formas estables de todo tipo.

A primera vista, la explicación parece sencilla. Cuando la arena comienza a apelmazarse por efecto del agua, una proporción considerable de la energía previamente almacenada en forma de tensión superficial se cede al entorno. Por tanto, quien desee remodelar los grumos que se formen tendrá que añadir de nuevo dicha energía al sistema.

Sin embargo, mientras que un pastel necesita que sus ingredientes se encuentren en proporciones muy precisas para adquirir la consistencia adecuada, lograr la mezcla correcta de agua y arena para levantar un castillo y que este no se derrumbe constituye, literalmente, un juego de niños. Ello se debe a que la rigidez de la mezcla prácticamente no depende del contenido de agua, al menos dentro de un abanico muy amplio de valores. Solo cuando la proporción supera cierto umbral (como cuando una corriente de agua se lleva los cimientos del castillo), la mezcla se licua de nuevo y comienza a «ondular» en el medio acuoso de modo similar a la arena seca impulsada por el viento. ¿A qué se debe?

En su calidad de sistemas no lineales, un área de la física que en las últimas décadas ha consolidado su estatus como disciplina independiente, los medios granulares han recibido una atención creciente durante los últimos años. A su estudio se sumó el grupo de Stephan Herminghaus, del Instituto Max Planck de Sistemas Dinámicos y Autoorganizados (MPIDS) de Gotinga. Los investigadores emplean en sus experimentos minúsculas cuentas de vidrio, lo que evita las complicaciones artificiales causadas por los diferentes tamaños de los granos de arena. Después, para trasladar los resultados al caso de la arena, basta con tener en cuenta su mayor rugosidad. En general, este aspecto conduce a una mayor rigidez de la mezcla, ya que por un lado facilita que los granos se enganchen unos a otros y, por otro, estos disponen de más superficie de contacto que las cuentas de vidrio.



AGUA, ARENA Y AIRE: Al mezclar agua y arena, las diferencias de tensión superficial tienden a maximizar el contacto entre el líquido y los granos y a disminuir el existente entre el aire y el agua. Los gránulos se adhieren gracias a la aparición de puentes capilares acuosos.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, SEGÚN H. JOACHIM SCHLICHTING

Superficies en competición

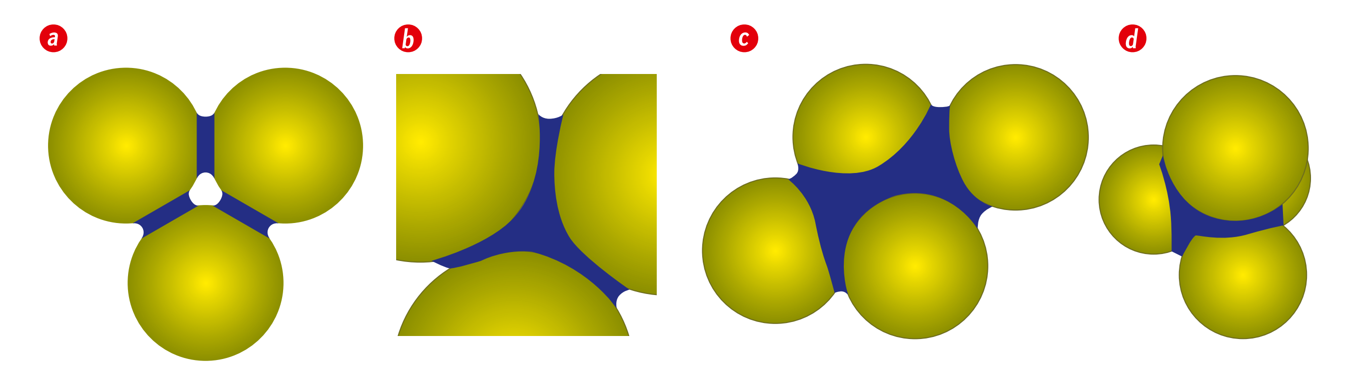
La mezcla de arena y agua sigue un principio básico. Para que se forme una superficie de contacto entre ambas sustancias, hace falta cierta tensión superficial. Según el segundo principio de la termodinámica, la naturaleza invertirá la menor cantidad posible de energía y cederá al entorno tanta como pueda. Al mismo tiempo, también tenderá a formar una superficie de contacto lo menor posible. Las superficies de contacto entre la arena y el agua resultan energéticamente más favorables (requieren menos energía para formarse) que aquellas que tienen lugar entre el agua y el aire, por lo que las primeras aumentarán a costa de las últimas.

Muy cerca del punto en que dos granos de arena se tocan, dicha ventaja energética se torna decisiva. En esas regiones, la superficie de contacto entre el agua y la arena necesita muy poca agua para formarse, por lo que requiere aún menos tensión superficial. Se trata del mismo principio por el que, en un tubo de vidrio delgado (un capilar), el agua puede ascender por sí sola. Por esa razón, también en el caso de los granos de arena se habla de la formación de «puentes capilares». Estos fijan los granos entre sí y hacen que el conjunto comience a endurecerse.

Si quisiéramos volver a separar los granos de arena, tendríamos que inyectar en el sistema la energía que antes se disipó al entorno a fin de reestablecer las superficies de contacto entre la arena y el aire, más energéticas. La fuerza mecánica que se opone a dicho proceso da cuenta de la rigidez y la firmeza de la arena húmeda.



UN MATERIAL SEGURO: La arena húmeda permite levantar auténticos palacios. Las curiosas propiedades de este material evitan que tengamos que preocuparnos por su estabilidad.



ESTRUCTURAS MICROSCÓPICAS: Una estructura típica consta de tres gránulos unidos por otros tantos puentes capilares a. Al incorporar más agua, esta tenderá primero a rellenar los huecos entre las uniones ya existentes b, lo que apenas afectará a la rigidez del conjunto. La paulatina adición de agua desencadenará la formación de estructuras cada vez más complejas c y d.

THINKSTOCK/YORY FRENKLAKH (*castillo de arena*); *SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT*, SEGÚN M. SCHEEL ET AL. EN *NATURE MATERIALS*, VOL. 7, PÁGS. 189-193, 2008 (*fig. 2a*)

Fusión de capilares

Para observar el proceso con detalle, los investigadores del MPIDS se sirvieron del tomógrafo de rayos X del acelerador de electrones del Instituto Laue-Langevin de Grenoble. Al humedecer los gránulos, comprobaron que el número de puentes capilares por partícula ascendía primero a seis, aproximadamente. La máxima estabilidad se conseguía cuando la proporción entre el volumen de líquido y el de granulado alcanzaba el 2,5 por ciento. Al añadir más agua, las superficies de contacto entre partículas y líquido se dilataban tanto que incorporaban puentes capilares anejos y formaban estructuras mayores y más complejas. Pero, en general, la rigidez mecánica de la arena permanecía constante hasta que la proporción de líquido alcanzaba el 16 por ciento.

Durante el proceso, las superficies de contacto se juntan de manera paulatina. Primero, tres puentes capilares dan lugar a una unión triple de gránulos (*a*). Al añadir agua, lo más ventajoso desde un punto de vista energético es que esta fluya hacia los intersticios ocupados por aire (*b*), ya que así el sistema puede ceder más energía al entorno que si se formaran nuevas superficies de contacto pero con huecos. Si se continúa añadiendo agua, las uniones adoptarán formas más intrincadas y el agua sobrante se almacenará en los espacios intermedios (*c* y *d*). Llegados a este punto —y siempre que haya suficientes espacios huecos para rellenar y el agua no inunde el granulado—, la estabilidad mecánica de la arena húmeda ya no dependerá de la cantidad de agua absorbida, sino del tamaño de los granos y de la tensión superficial del líquido.

Los aficionados a los castillos de arena deben agradecer a dicho mecanismo la capacidad de este medio granular para almacenar agua. Gracias a ella, mantener estable una construcción de arena no presenta mayores problemas, ya que basta con rociarla de tanto en tanto con agua a fin de que no seque.

Aunque Herminghaus y sus colaboradores han logrado explicar las bases físicas de la estabilidad de los castillos de arena, su verdadero objetivo era otro: la gran industria. En numerosos sectores, desde el químico hasta el de la construcción, pasando por el de la alimentación o el farmacéutico, buena parte de las materias primas se encuentran en forma granulada. En un futuro, incluso la predicción de seísmos o la extracción de petróleo de rocas porosas podrían beneficiarse del trabajo de los investigadores.

PARA SABER MÁS

Morphological clues to wet granular pile stability. M. Scheel et. al. en *Nature Materials*, vol. 7, págs. 189-193, 2008.

EN NUESTRO ARCHIVO

Castillos de arena húmeda. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, agosto de 2005.

Nuevos estados marginales. Vincenzo Vitelli y Martin van Hecke en *IyC*, mayo de 2012.

por Bartolo Luque



Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Atascos fantasma en el tráfico rodado

Un ejemplo de fenómeno emergente y comportamiento crítico en la vida cotidiana

Se calcula que en estos momentos circulan por el mundo unos 1200 millones de coches. Con semejante cifra, los atascos de tráfico suponen extraordinarias pérdidas de tiempo y dinero. Por esa razón, entender por qué se producen y cómo evitarlos ha estado en la agenda de los investigadores desde los años cincuenta del siglo XX.

Por aquella época, los matemáticos James Lighthill (1924-1998) y Gerald Whitham (1927-2014) propusieron describir el tránsito viario (un flujo de vehículos) como un líquido que avanza a través de una tubería. El hoy célebre modelo de Lighthill-Whitham se basa en ecuaciones diferenciales en derivadas parciales obtenidas a partir de las leyes de la física de fluidos. Aunque con el tiempo ha ido complicándose y enriqueciéndose, ninguna de esas modificaciones ha logrado incorporar la principal diferencia entre un fluido y el tráfico rodado: las moléculas no gozan de libre albedrío, los automovilistas sí. Este ingrediente resulta clave para describir con acierto la dinámica del tráfico.

En los años noventa aparecieron modelos discretos que, aparte de resultar más fáciles de simular en un ordenador, introducían la diversidad intrínseca a los agentes que participan en el fenómeno colectivo de la conducción. Para ello, tales modelos recurren a una estrategia muy simple que, sin embargo, ofrece unos resultados sorprendentemente correctos.

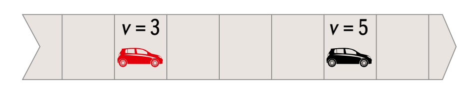
En 1992, los físicos Kai Nagel y Michael Schreckenberg propusieron un modelo sencillo para entender la compleja dinámica de los embotellamientos. Con el tiempo, su propuesta acabaría por convertirse en la base de numerosas planificaciones para paliar los atascos. El modelo Nagel y Schreckenberg, o modelo NaSch, reproduce muchas de las características del tráfico real. Entre ellas, los «atascos fantasma»: aquellos que no tienen una causa extrínseca, como un accidente o un desvío por obras, sino que emergen sin razón aparente. El modelo NaSch constituye un excelente ejemplo de cómo se estudia el comportamiento colectivo en el marco de los sistemas complejos.

Reglas de tráfico

La propuesta original considera una carretera de un solo carril y sentido representada por L casillas de idéntico tamaño, así como $N \leq L$ vehículos que circulan por ella. En el modelo, la casilla 1 se conecta con la L, lo que equivale a considerar una circunferencia; es decir, una de nuestras queridas rotondas. En jerga técnica, a esto se le denomina imponer condiciones de contorno periódicas.

Cada casilla puede estar vacía u ocupada a lo sumo por un vehículo. Estos circulan con una velocidad v que toma valores enteros: 0 (el coche está detenido), 1 (recorre una casilla en un paso de tiempo), 2, 3... hasta v_{max}, la velocidad máxima posible. Al igual que el espacio, el tiempo también es discreto. Así, una velocidad igual a 4 en el instante t significa que, en $t + 1$, el vehículo habrá avanzado 4 casillas.

En un instante t, el estado del tráfico queda descrito por las posiciones y velocidades de todos los coches. Por ejemplo:

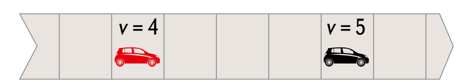


Para computar el nuevo estado en $t + 1$, se aplican 4 reglas en paralelo, es decir, de forma síncrona, a todos los vehículos.

❶ **Aceleración:** Si un vehículo no ha alcanzado la velocidad máxima, v_{max}, aumenta su velocidad en una unidad:

$$v(t + 1/3) = \min\{v(t) + 1\,,\, v_{max}\}\,,$$

donde hemos empleado $t + 1/3$ de manera simbólica para indicar que nos encontramos en un paso intermedio. En nuestro ejemplo, donde supondremos que $v_{max} = 5$, las velocidades pasan a ser:



❷ **Frenado determinista:** La regla 1 queda supeditada a evitar choques, por lo que todo vehículo recorrerá, como mucho, la distancia d que lo separa de su predecesor. Así:

$$v(t + 2/3) = \min\{v(t + 1/3)\,, d\}\,.$$

El coche rojo de nuestro ejemplo se encuentra a una distancia $d = 3$ del negro, por lo que reducirá su velocidad a 3. El coche negro también se halla a una distancia 3 del rojo (recordemos que las condiciones de contorno periódicas conectan los extremos), de modo que también frenará para bajar su velocidad de 5 a 3.



❸ **Frenado aleatorio:** Las distracciones o comportamientos inesperados del conductor pueden incorporarse como una probabilidad de que el vehículo reduzca su velocidad de manera aleatoria. Así, con probabilidad p, y si el vehículo aún no se ha detenido, la velocidad calculada por las reglas 1 y 2 se reducirá en una unidad:

$$v(t + 1) = \max\{v(t + 2/3) - 1\,, 0\}\,,$$

y, con probabilidad $1 - p$:

$$v(t + 1) = v(t + 2/3)\,.$$

Supongamos que en nuestro ejemplo $p = 0{,}5$. Lanzamos una moneda para el coche rojo y, como ha salido cara, el automóvil frena en una unidad. Hacemos lo mismo para el coche negro; dado que ahora hemos obtenido una cruz, este mantiene su velocidad. Según Nagel y Schreckenberg, este proceso captura las fluctuaciones de velocidad debidas a las

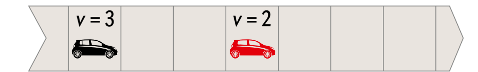
veleidades del comportamiento humano o a las variaciones de las condiciones externas. Aporta, además, la clave para la aparición de atascos espontáneos.



4 Movimiento: Si la posición de un vehículo en t es $x(t)$, su nueva posición en $t + 1$ será:

$$x(t + 1) = x(t) + v(t + 1)\,.$$

En nuestro ejemplo, el coche rojo avanza dos casillas y el negro tres. Así que la configuración en $t + 1$ viene dada por:



Para llevar a cabo una simulación, en el instante $t = 0$ se sitúan N coches al azar con velocidades iniciales nulas. La circulación se consigue aplicando las cuatro reglas anteriores sucesivamente y en paralelo. Tras un tiempo de relajación de unas diez veces el tamaño L del sistema, podremos suponer que se habrá alcanzado un estado estacionario. (En rigor, dado que el modelo es estocástico, el estado estacionario solo lo alcanzan los valores promedio de las variables del sistema.)

Dinámica global

Debido a su alto grado de simplificación, este tipo de modelos se conocen entre los expertos como «modelos de juguete», traducción literal del inglés *toy model*. En particular, el modelo NaSch es mínimo, o irreducible: la exclusión de cualquier elemento acarrea la pérdida de las propiedades emergentes. Sin embargo, a pesar de la naturaleza discreta y elemental de la simulación, esta reproduce las principales características del tráfico real.

Si ejecutamos la simulación, podremos representar la evolución del tráfico en un gráfico espaciotemporal como el de la derecha. El eje horizontal corresponde al espacio (las casillas 1 a L de izquierda a derecha; es decir, en el sentido de circulación). El eje vertical representa el tiempo, que aquí transcurre hacia abajo. Cada punto simboliza un vehículo en la casilla correspondiente. Así, una línea horizontal representa las posiciones de los coches en un instante t, y las inmediatamente superior e inferior, las posiciones en $(t - 1)$ y $(t + 1)$, respectivamente.

El diagrama nos permite seguir la trayectoria de cada coche (un punto). Esta viene dada por una línea punteada inclinada en el sentido del movimiento. Como las condiciones de contorno son periódicas, un vehículo que desaparezca por la derecha reaparecerá acto seguido en el extremo izquierdo. El diagrama describe la dinámica global del sistema; es decir, el movimiento de todos los coches a la vez. Y, como veremos, reproduce de manera cualitativa varios efectos que han sido observados en el tráfico real.

¿Qué indican las acumulaciones de puntos? Ni más ni menos que los odiados atascos fantasma. ¿Nota algo curioso en su evolución? Los embotellamientos se mueven hacia la izquierda, en sentido contrario al de los coches. Mientras que los automóviles situados por delante dejan atrás el atasco, los de detrás van incorporándose a la caravana. Si el flujo total se conserva, el embotellamiento mantiene su tamaño y se desplaza hacia atrás. Si los flujos de entrada y salida no coinciden, la magnitud del atasco cambia con el tiempo. Así pues, el modelo recrea la formación espontánea de un fenómeno muy conocido por los expertos: las ondas de tráfico que se propagan contracorriente.

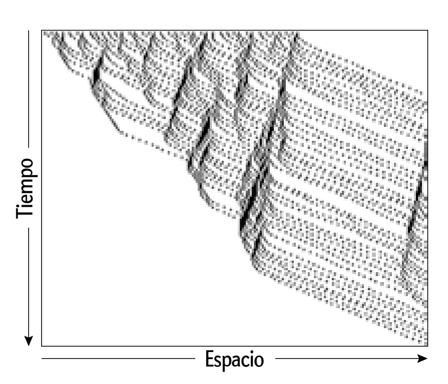


DIAGRAMA ESPACIOTEMPORAL: Resultado de simular el modelo NaSch en un ordenador. Cada punto indica la posición de un vehículo en cada instante. Los atascos fantasma (agrupaciones densas) avanzan en sentido opuesto al de la circulación.

Aunque el modelo constituye una simplificación extrema de la realidad, parece captar la esencia del tráfico. Podemos ejecutar distintas simulaciones para diferentes densidades de vehículos, $\rho = N/L$, y medir para cada una de ellas el flujo promedio; es decir, el número medio de coches que pasan por una casilla en una unidad de tiempo. La representación del flujo en función de la densidad se conoce como diagrama fundamental. En la figura superior vemos el aspecto cualitativo que adopta dicho diagrama en el modelo NaSch, el cual resulta similar al observado empíricamente.

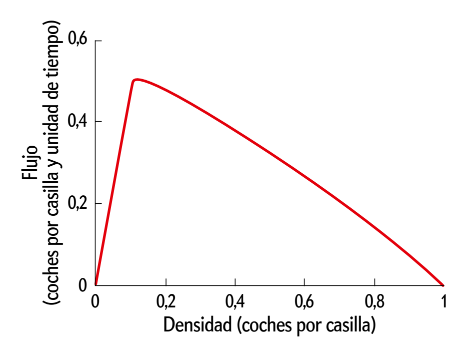


DIAGRAMA FUNDAMENTAL: Flujo de vehículos (número medio de coches que pasan por una casilla en una unidad de tiempo) en función de la densidad del tráfico. Al principio el flujo aumenta con la densidad. A partir de cierto valor crítico (*máximo*) comienzan a aparecer atascos y el flujo disminuye.

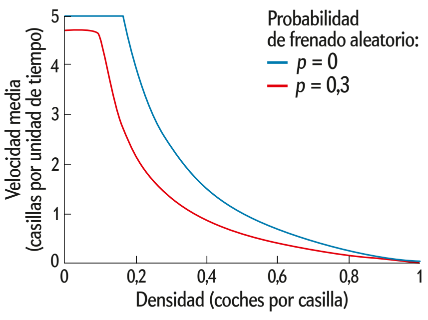
Con independencia del valor de la componente estocástica, p, la circulación es fluida (no hay atascos) para densidades bajas. Sin embargo, dado que circulan pocos vehículos, el flujo es reducido. Este aumenta linealmente con la densidad hasta que, al llegar a cierto valor crítico, ρ_c, alcanza un máximo. Es entonces cuando comienzan a aparecer los atascos. Luego, a medida que la densidad aumenta, estos se hacen mayores y más frecuentes, lo que disminuye el flujo. Para la densidad $\rho = 1$, todas las casillas se encuentran ocupadas y nadie puede moverse.

Un valor mayor de p hace que los atascos fantasma aparezcan antes (a menor densidad), pero no altera la forma cualitativa del diagrama. El único cambio es que el máximo y, por ende, la densidad crítica, se desplazan hacia la izquierda.

Transiciones de fase

El paso de un tráfico laminar a otro con atascos se aprecia con claridad al representar la velocidad media de los vehículos en función de su densidad. La figura de la página siguiente muestra que, si eliminamos la componente aleatoria del modelo ($p = 0$), a densidades bajas el estado estacionario del sistema nos lleva a una velocidad media constante que coincide con la máxima permitida, v_{max}. Estamos en la fase laminar, carente de atascos. Esta se man tiene hasta alcanzar la densidad crítica, dada por $\rho_c = 1/(v_{max} + 1)$, donde comienzan a aparecer los embotellamientos. A partir de ahí, la velocidad media disminuye hasta anularse en $\rho = 1$.





FLUJO LAMINAR Y CON ATASCOS: Velocidad media de los vehículos en función de la densidad del tráfico, sin (*azul*) y con (*rojo*) frenadas aleatorias. Antes del punto crítico el flujo es laminar; es decir, sin atascos. Después, el sistema entra en una fase turbulenta en la que el aumento en la frecuencia de los embotellamientos disminuye la velocidad media.

Si introducimos la componente aleatoria y tomamos, por ejemplo, $p = 0{,}3$, el resultado es que, en cada paso de tiempo, el 30 por ciento de los vehículos reducirá su velocidad. Por tanto, a densidades bajas, la velocidad media será menor que en el caso determinista. Además, el valor de la densidad crítica se verá desplazado hacia la izquierda; es decir, los atascos comenzarán a aparecer antes que en el caso determinista.

Los físicos hablan de transiciones de fase cuando las propiedades macroscópicas de un sistema cambian de manera repentina al variar cierto parámetro. Así ocurre cuando el agua hierve o se congela al alcanzar cierta temperatura. Los expertos distinguen entre transiciones de fase de primer y de segundo orden. Las de primer orden implican una reestructuración microscópica de la sustancia, como sucede en el agua. Las de segundo orden, en cambio, no pueden detectarse al examinar una muestra microscópica del sistema. Un ejemplo típico lo hallamos en la imantación espontánea de los materiales ferromagnéticos.

Numerosas transiciones de fase de segundo orden tienen lugar entre una fase simétrica, u ordenada, y otra asimétrica o desordenada. En el modelo NaSch, el paso de un tráfico fluido a otro congestionado puede entenderse como una transición de fase de segundo orden. El diagrama fundamental nos sugiere que la circulación puede encontrarse en una de dos fases claramente diferenciables: una laminar, sin atascos, y otra turbulenta, en la que los embotellamientos se suceden con frecuencia. Ambas están separadas por un valor crítico de la densidad. En él, el sistema alcanza el máximo flujo posible.

Así pues, parece que lo ideal sería que el tráfico alcanzase siempre la densidad critica, ¿no? Sin embargo, aunque dicha situación es óptima para el tráfico en su conjunto, para cada uno de los conductores puede convertirse en un infierno.

Supongamos que conducimos uno de los vehículos y que deseamos predecir cuánto tardaremos en dar una vuelta al circuito. Para cada valor de la densidad, nuestro modelo nos permite calcular la velocidad media. A densidades bajas no hay atascos fantasma, por lo que la incertidumbre es mínima: el tiempo medio que tardaremos en completar el recorrido vendrá dado, con muy buena aproximación, por la longitud L dividida entre la velocidad media. A densidades altas la velocidad media será menor. Sin embargo, los atascos se sucederán muy a menudo, por lo que también podremos calcular con poca incertidumbre cuánto tardaremos en llegar.

Pero ¿qué ocurre cerca de la densidad crítica, ρ_c? Aunque en este caso el flujo medio es óptimo, ahora resulta tan probable no encontrarnos con ningún atasco como toparnos con uno descomunal. La incertidumbre es máxima, por lo que la velocidad media no nos proporciona ninguna información útil para estimar cuánto nos demoraremos. Aunque desde un punto de vista global el tráfico resulta más eficiente, un conductor concreto nunca podrá saber cuánto tardará en llegar.

Así pues, el modelo nos muestra algo inesperado: que el precio de la máxima eficiencia global es la máxima incertidumbre individual. Una bella excusa técnica para cuando llegue tarde a una cita.

PARA SABER MÁS

A cellular automaton model for freeway traffic. K. Nagel y M. Schreckenberg en *Journal de Physique I*, vol. 2, n.º 12, pág. 2221, 1992.

Masa crítica: Cambio, caos y complejidad. Philip Ball. Turner, 2008.

Traffic flow dynamics: Data, models and simulation. M. Treiber y A. Kesting. Springer Verlag, Berlín-Heidelberg, 2013.

EN NUESTRO ARCHIVO

Informática y tráfico. Kenneth R. Howard en *Presente y futuro de los transportes*, colección *Temas de IyC* n.º 13, 1998.

Paradojas y atascos de tráfico. Juan M. R. Parrondo en *IyC*, septiembre de 2002.

La universalidad de los atascos. Ángel Garcimartín e Iker Zuriguel en *IyC*, mayo de 2015.



HUMANIDADES E INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA. UNA PROPUESTA NECESARIA.

Coordinado por Norbert Bilbeny y Joan Guàrdia. Publicaciones y Ediciones de la Universidad de Barcelona, Barcelona, 2015.

A vueltas con las dos culturas

Las sinergias entre ciencias y humanidades

El libro de C. P. Snow *Las dos culturas* denunciaba la excesiva separación entre ciencias y humanidades. Esta constatación implicaba que en algún momento la cultura fue una. Pero la necesaria especialización condujo a la escisión. La denuncia valía también como llamada a una tarea: la reintegración, o al menos la comunicación, entre las dos culturas. En esta labor se empeña el libro *Humanidades e investigación científica*, coordinado por Norbert Bilbeny y Joan Guàrdia, de la Universidad de Barcelona.

Este libro coral se originó en un curso de verano celebrado en 2011 bajo el rótulo de *Presente y futuro de las humanidades*. La mayoría de las aportaciones resultan de interés para un público amplio, están escritas con claridad y espíritu divulgativo, al tiempo que mantienen el tono de rigor académico. Por otro lado, el contenido es un tanto desigual.

Lo que conecta todos los capítulos es la convicción de que ciencias y humanidades están llamadas —¿condenadas?— a entenderse. Las palabras clave son *sinergia* y *fecundación*. Las ciencias y las humanidades han de fecundarse mutuamente, han de establecer sinergias. Los términos que deben evitarse son *mezcolanza*, *pseudo-ciencias* y *pseudo-humanidades*. No se trata de ignorar ahora precipitadamente las diferencias.

A veces el libro transmite la idea de que las ciencias básicas y las humanidades están siendo presupuestariamente maltratadas: «Es manifiesto que los fondos y los programas dedicados a las ciencias teóricas y a las humanidades decrecen en comparación con los destinados a la ciencia experimental y al saber, en todo caso, de inmediata utilidad y rentabilidad». Es perfectamente legítimo que científicos y humanistas formen un *lobby* ante tal situación. Pero, junto a estos motivos para la convergencia, están también las justas razones. La colaboración entre ciencias y humanidades favorecerá, según los autores, el bienestar de las personas y el respeto a la dignidad humana.

Recoge el texto dos tipos de capítulos. Unos ofrecen puentes entre ciencias y humanidades; otros se ocupan de alguna de las disciplinas que no encajan bien en esa dicotomía. En el primer grupo militan los capítulos más filosóficos. Así, el propio Bilbeny descubre que la curiosidad y la admiración han funcionado como motor tanto de las ciencias como de las humanidades. Apela a los textos de Aristóteles sobre la admiración y el asombro como emociones estéticas y epistémicas que nos impulsan en todos los terrenos del saber. De tenor filosófico es también el capítulo de Manuel Cruz. Nos habla del oficio de filósofo y de las aportaciones que puede hacer al bien común. Una de ellas consiste en ejercer como puente entre ciencias y letras o, más bien, entre realidad y lenguaje. Aún en el terreno de lo filosófico, encontramos el capítulo de Daniel Innerarity. Se inspira en la tradición hermenéutica, cuyas categorías nos ofrece como mediación. Es más, su posición se radicaliza cuando afirma que *todo* es hermenéutica, todo es interpretación. De ese modo, la distinción entre letras y ciencias quedaría superada. En mi opinión, la posición de Innerarity es excesivamente relativista, pues, junto al concepto de verdad como «experiencia interpretativa», se requiere, tanto en ciencias como en letras, un concepto de verdad como correspondencia.

Es, a su modo, también filosófico el capítulo de David Jou, uno de los más profundos y lúcidos del libro. Entiende que la sabiduría integra y supera la información que viene de las ciencias y las humanidades, la convierte en conocimiento, y, con este, orienta correctamente la acción humana. La sabiduría, fruto de la experiencia vivencial, extrae de los simples datos orientación, sensatez y sentido. Jou hace, además, una advertencia que tiene que ver con la llamada tercera cultura. Esta tercera vía fracasa si se entiende como una cultura en la que las preguntas son tomadas de las humanidades y las respuestas de las ciencias.

El capítulo de Ramón Alcoberro nos habla de tecnoética; en primer lugar de sus clásicos, como Ellul o Jonas, y después de la tecnoética contemporánea: «el futuro de la libertad humana depende de la capacidad de la tecnoética para [...] repensar la autonomía en las sociedades de la conectividad».

El segundo tipo de capítulos están centrados en disciplinas que no encajan en la dicotomía ciencias-humanidades. El caso más obvio es el de las ciencias humanas. La posición de las mismas es abordada por Genoveva Martí. En esta clave podemos citar también el capítulo de Nolasc Acarín, donde se describe la especial posición de la medicina. Por un lado es ciencia aplicada, por otro es oficio humanista. El autor pide que se entienda, pues, su texto como «un comentario ordenado sobre la vertiente humanística del ejercicio de la medicina».

La economía también nada entre ciencias y humanidades. Según Antonio Arrieta, el enfoque humanista tiene una función importante en la investigación económica. Aunque este papel haya sido olvidado en algún momento, bajo la influencia del marxismo —«Marx simplemente trata a las personas como miembros de una clase social [...] sin tener en cuenta a los individuos como tales»— o del neoliberalismo. Óscar Dejuán aboga por «humanizar la ciencia económica para que cumpla mejor la función social», en la senda abierta por Amartya Sen.

Tampoco las ciencias del diseño encuentran acomodo en la dicotomía humanidades-ciencias. Existe un «modo de investigación que es propio y característico de las Bellas Artes y del Diseño», nos dicen Anna Calvera y M. Dolors Tapias. Esta observación añade complejidad al planteamiento del libro, pues en el polo humanístico se van acumulan-

do cuasi-sinónimos que aportan distintas connotaciones: humanidades, letras, artes.

La conexión entre lo artístico y lo humanístico da pie a José Esteve para reflexionar sobre la posición del derecho. Fue en sus inicios disciplina humanista. Después, en consonancia con la Ilustración y el positivismo, quiso acogerse a la certeza científica. Pero hoy sabemos que la ciencia convive con la incertidumbre. En estas condiciones, el derecho acude actualmente al principio de precaución, lo cual es interpretado por el autor como una nueva apelación a la ciencia, ahora como cálculo de riesgos. Creo que en este aspecto malinterpreta el principio, que tiene más que ver con la prudencia que con la ciencia. Pero, siguiendo su argumento, el autor aboga por una vuelta del derecho a sus raíces humanistas, esta vez de la mano de la literatura.

Históricamente muchos han sido los literatos que han recibido influencias de la ciencia y muchas las ciencias beneficiadas por la imaginación literaria. El capítulo de Marisa Siguan ofrece un buen elenco de ejemplos.

También la autoimagen de la psicología ha ido oscilando. Al principio se veía como una de las humanidades; después se identificó, al menos en los métodos de investigación, con las ciencias sociales; y más tarde con las ciencias de la salud, especialmente en cuanto al ejercicio de la profesión. En la actualidad, según Joan Guàrdia, todos estos aspectos tienden a coordinarse en una psicología poli-paradigmática.

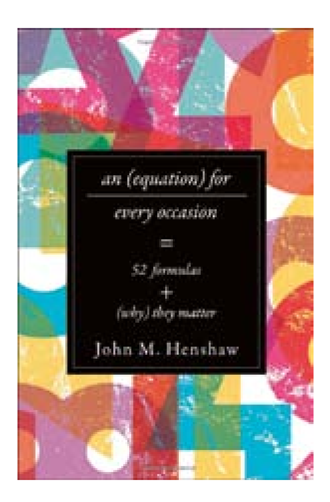
La cara histórica de la relación entre ciencias y humanidades es abordada por Carles Mancho. Se fija especialmente en la historia del arte. Extrae de las conexiones registradas algunas indicaciones de carácter pedagógico, que también se hallan presentes, por otra parte, en un buen número de capítulos. Coinciden en lo inapropiado de una especialización demasiado temprana.

Ya hacia el final del libro aparecen dos capítulos, uno dedicado a la conexión que la genética plantea entre sus bases biológicas y sus implicaciones para la vida de las personas, y otro centrado en la idea de tiempo, presente tanto en ciencias como en humanidades. El primero está escrito por Gemma Marfany y el segundo por Javier Tejada.

Por último, merece mención aparte el capítulo de David Bueno, pues ofrece un marco teórico global para el resto del libro. Aclara qué ha de entenderse por ciencias y por humanidades, detecta los riesgos de una mala conexión entre ambas y propone las ideas de fertilización y sinergia. Ofrece, además, un sentido para esta sinergia: «contribuir al bienestar y a la dignidad humanos».

El balance, en suma, resulta positivo. El lector puede asomarse a la procelosa panorámica de la interdisciplinariedad de la mano de una pléyade de capítulos en general muy claros y rigurosos.

—Alfredo Marcos
Universidad de Valladolid



AN EQUATION FOR EVERY OCCASION. 52 FORMULAS AND WHY THEY MATTER

Por John M. Henshaw. With contributions from Steven Lewis. Johns Hopkins University Press, Baltimore, 2014.

El mundo de las ecuaciones

Matemática y física de la vida diaria

Se recogen 52 relatos, inspirados en otras tantas ecuaciones. Barajan un mundo variopinto de esporas, negocios, historia, bellas artes, ciencia e ingeniería. Con ese rico anecdotario se pretende despertar el interés en la matemática y se subraya su poder y utilidad. Con ecuaciones podemos describir y entender los esquemas de Ponzi, el efecto placebo, «los años del can», el cociente intelectual, la mecánica ondulatoria de los tsunamis, el desastre del *Challenger* y mucho más. El libro no solo sirve para gozar de la matemática, sino también para comprender las obras del universo.

Cualquier editor suscribiría el consejo que se le dio a Stephen Hawking mientras redactaba su conocidísima *A brief history of time*: por cada ecuación que se incluya en el libro se pierde la mitad de las ventas. Ante tan obscuro panorama, recogió solo la ecuación de Einstein: $E = mc^2$. Aquí aparece una ecuación al inicio del capítulo. Cabe desear con los autores que no se cumpla la previsión del editor de Hawking, que, en forma, diría: ventas reales = ventas potenciales/2^n, donde n sería el número de ecuaciones del texto. Y puestos a escoger entre un matemático según Lord Kelvin y el común de los mortales, también los autores dicen numerarse entre los segundos. Espiguemos, al azar, un breve muestrario.

Entre las primeras ecuaciones que aprenden los escolares sobresale la que representa la ley newtoniana de la gravitación universal: $F = Gm_1m_2/r^2$. Aparece en los *Principia* de Newton, publicados en 1687. Establece que la fuerza, F, que se ejerce entre dos cuerpos de masa m_1 y m_2, respectivamente, es directamente proporcional al producto de dichas masas ($m_1 \times m_2$) e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, r, entre ambos cuerpos. G simboliza la constante universal de la gravitación, que en libros como este leemos que vale aproximadamente $6{,}67 \times 10^{-11}$ m^3/(kg·s^2).

Lo que los escolares desconocen es que cuesta mucho medir el valor exacto de la constante de la gravedad, porque es extremadamente débil, 39 órdenes de magnitud más débil que la fuerza eléctrica de un átomo. En junio de 2014 se publicó un estudio en el que el empleo de átomos fríos aportaba nuevos datos de interés para la determinación de la constante. Para llegar a esa determinación, los autores emplearon átomos enfriados con láser e interferometría cuántica. Obtuvieron el valor de $G = 6{,}67191(99) \times 10^{-11}$ m^3 kg^{-1} s^{-2} con una incertidumbre relativa de 150 partes por millón (la incertidumbre estándar combinada se da entre paréntesis). La interferometría de átomos es un método que se basa en la naturaleza ondulatoria de los átomos fríos para medir con precisión la aceleración gravitatoria.

Usando esa ley, Newton predijo con precisión el movimiento de la Luna en torno a la Tierra. Pero las confirmaciones más importantes llegaron tras su muerte, en 1727. Así, el planeta Urano fue descubierto por el astrónomo William Herschel en 1781. En 1846, Urano apenas si había completado una órbita alrededor del Sol desde su descubrimiento, pero había transcurrido tiempo suficiente para que los astrónomos se percataran de diversas anomalías en la trayectoria del planeta que podían explicarse por la ley de la gravitación universal. Todo apuntaba hacia la existencia de otro planeta escondido, otro cuerpo cuya masa causara las peculiaridades inexplicadas de la órbita. Fue un matemático, y no un astrónomo, quien descubrió el planeta esquivo, Neptuno. Ese año, Urbain Le Verrier aplicó la ley de gravitación universal para predecir correctamente la ubicación de Neptuno.

En 1916, Albert Einstein propuso tres pruebas para contrastar su teoría general de la relatividad. Una de ellas correspondía a las perturbaciones inexplicables de la órbita de Mercurio, el planeta más próximo al Sol. La teoría general de la relatividad explica la gravitación en términos de curvatura del espaciotiempo. La precesión «anómala» de la órbita del planeta no puede calcularse a partir de la ley de Newton pero sí con la teoría de la relatividad.

Otra ecuación de la vida diaria harto recurrida es la del índice de la masa corporal (IMC). El relato parece tomado de unos almacenas de ropa, si reparamos en el título: «¿Me ves gorda con estos vaqueros?». En forma, ese índice se expresa del modo siguiente: IMC= masa/altura^2. Esto es, el índice de la masa corporal constituye la razón entre la masa en kilogramos y la altura en metros de un individuo adulto elevada al cuadrado.

Debemos esa fórmula a Adolphe Quetelet (1796-1874), un belga experto en estadística, matemática y astronomía. Buscaba un número que sirviera para categorizar a los individuos con relación a su altura corporal. Con la mera declaración del peso de un sujeto no sabemos en general si está obeso o se halla en una zona media, si desconocemos su altura. E ideó la fórmula que le permitía obtener una buena aproximación en una sola cifra. Se ha objetado que el cuadrado del denominador pudiera ser demasiado bajo y quizá fuera mejor sustituirlo por un exponente de 2,6. Hoy hacen uso del índice de Quetelet las compañías aseguradoras para determinar riesgos de salud y tabular la cuota.

El de masa corporal nos lleva a otro índice, el cociente intelectual: CI = (edad mental/edad real) × 100. La edad real remite a la edad cronológica. La ecuación predice un conciente de inteligencia de 100 para un niño «normal», es decir, aquel cuya edad mental coincide con su edad real. Los primeros tanteos en ese terreno se remontan hasta el año 1905, cuando se le encomendó al psicólogo André Binet (1857-1911) desarrollar un sistema para identificar a los niños que necesitasen ayuda en su desarrollo escolar.

Los trabajos iniciales de Binet fueron completados por otros investigadores.

Y así se llegó a la ecuación reseñada, obra directa del psicólogo alemán Wilhelm Stern, quien la dio a conocer en 1912. De acuerdo con la misma, un niño de 10 años de edad que presenta una edad mental de 12 años tendrá un cociente intelectual de 120, que se obtiene de dividir 12 por 10 y multiplicar el resultado por 100. Esa herramienta se generalizó sin discernimiento en un afán por clasificar a todos, desde el genio hasta los lentos en aprender, y en muy diversas profesiones, con particular énfasis en los ejércitos o en los ingresos en la universidad.

Muy pocos se resisten a la belleza del teorema de Pitágoras: $a^2 + b^2 = c^2$, la suma de los cuadrados de los catetos es igual cuadrado de la hipotenusa. Pone, pues, en relación los catetos de un triángulo rectángulo con su hipotenusa. En un triángulo rectángulo, uno de los ángulos mide 90 grados. Los dos catetos del triángulo miden, respectivamente, unas longitudes a y b. A la hipotenusa corresponde el símbolo c. Pitágoras había nacido probablemente en la isla griega de Samos, hacia 570 a.C. Su inquietud intelectual abarcaba todas las ramas del conocimiento, de la matemática a la música, pasando por la metafísica, la ética o la política. No hay fuentes directas de su vida. Cuanto sabemos procede de autores que escribieron varios siglos después de su muerte.

Uno de los lemas de los pitagóricos es que los números rigen el mundo. Se les atribuye también hallazgos en el campo de la acústica musical, como el tono musical de una cuerda vibrante, inversamente proporcional a su longitud, lo que constituía el primer ejemplo de cuantificación aplicada a un fenómeno natural. Por lo que se refiere a la paternidad del famoso teorema, se halla envuelta en el misterio. Fue conocido ya por los babilonios y quizá por los chinos, un milenio antes del nacimiento de Pitágoras. Lo que resulta menos controvertido es la aportación pitagórica a la demostración del teorema. Hasta 400 pruebas se han contado del teorema. El problema surge cuando pretendemos sustituir los cuadrados por una potencia superior, que inevitablemente nos lleva a otra ecuación histórica: el teorema de Fermat.

El denominado último teorema de Fermat se expresa en forma: $a^n + b^n = c^n$. El exponente designa cualquier número entero positivo, y el teorema establece que no existen soluciones posibles de la ecuación para un n mayor que 2. Propuesto como conjetura en 1637 por Pierre de Fermat, no se demostró hasta 1994, hazaña realizada por Andrew Wiles. Sabemos que esa ecuación se cumple en infinito número de casos cuando n vale 1, siempre que a, b y c sean números enteros mayores que cero. Cuando n vale 2 tenemos el teorema de Pitágoras: si a, b y c son enteros positivos, entonces hay multitud de casos en que la ecuación se cumple. Si la potencia es de 3 en adelante, el último teorema de Fermat establece que la ecuación no tiene soluciones enteras. Lo que plantea bastantes interrogantes. ¿Podemos afirmar que, habiendo un número infinito de posibilidades para a, b y c, no exista ningún caso en que la ecuación sea cierta si n es mayor que 2? Eso es lo que afirma el último teorema de Fermat. ¿Cómo demostrar que semejante declaración sea verdadera? «Yo he encontrado una prueba», dejó anotado en los márgenes de un libro el matemático francés, «pero este espacio en blanco es muy estrecho para desarrollarla.» Y durante trescientos años, los matemáticos de todos los países se empeñaron en vano en descubrirla. Wiles necesitó más de cien páginas.

El libro no solo sirve para gozar de la matemática, sino también para comprender las obras del universo

De la poderosa mente de Fermat dan cuenta otras incursiones suyas en el campo de la teoría de números. Se ocupó de los números primos y de los números perfectos. Por número perfecto se entiende aquel entero que es suma de sus divisores. El primer número perfecto es el 6, puesto que 6 = 1 + 2 + 3, y 6 es divisible entre 1, 2 y 3. El siguiente es el 28. Pasamos luego al 496 y, después, al 8128. Hasta la fecha se han descubierto solo 47 números perfectos, el mayor de los cuales alcanza la astronómica cifra de 26 millones de dígitos. Todos los hallados son pares; para obtener un número perfecto impar, si existe, sería mayor que 10^{300}. De momento, se trata de un problema irresuelto.

Todos estamos en batalla constante contra el rozamiento. Para mover un cuerpo que se halla en contacto con otro se ha de vencer el rozamiento. Guillaume Amontons fue otro científico francés del siglo XVII, que realizó un trabajo notable sobre la fricción. Con su reconocida habilidad mejoró barómetros y termómetros. La fricción evita que los atletas caigan y detiene nuestro automóvil al pisar el freno. Siempre que un sólido se mueve con respecto a otro con el que se halla en contacto interviene el rozamiento, que, en física, constituye un apartado de la disciplina conocida por tribología. De acuerdo con la primera ley del rozamiento, que lleva su nombre, $F_f = mN$, donde F_f designa la fuerza necesaria para vencer el rozamiento estático entre dos cuerpos, m es el coeficiente de rozamiento, y N, la fuerza de un cuerpo ejercida sobre otro. Se han medido y tabulado los coeficientes de rozamiento de todo tipo de materiales. La ecuación indica que la fuerza de rozamiento es directamente proporcional a la carga aplicada entre los dos cuerpos. Amontons descubrió una segunda ley, que establece que la fuerza de fricción entre dos cuerpos es independiente de la superficie de contacto entre ellos.

El cine y las novelas de ciencia ficción recurren a menudo a la ecuación de Drake, que señala el número de civilizaciones de la Vía Láctea con las que podríamos entablar comunicación, N. En forma: $N = R^* \times f_p \times n_e \times f_e \times f_i \times f_c \times L$. La interpretación de los símbolos es la siguiente: R^* designa la tasa media de formación anual de estrellas en nuestra galaxia; f_p, la fracción de esas estrellas que presentan planetas; n_e, el promedio de planetas que pueden sustentar vida por estrella dotada de planetas; f_e, la fracción de planetas que realmente alojan vida en algún punto; f_i, la fracción de planetas sustentadores de vida que pueden desarrollar vida inteligente; f_c, la fracción de civilizaciones que desarrollan una técnica capaz de emitir hacia el espacio signos detectables de su existencia; L, longitud del tiempo de emisión de tales señales. Se han creado numerosas variaciones en torno a la ecuación. Lleva el nombre de Frank Drake, astrónomo y astrofísico norteamericano que la dio a conocer en la primera reunión internacional, celebrada en 1960, sobre búsqueda de inteligencia extraterrestre. Él mismo calculó el valor de N, que, con los escasos datos de que disponía y numerosas suposiciones, cifró en 10.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Julio 1965

La mosca común: ¿transmisora de enfermedades?

«Se ha descubierto que las moscas albergan hasta más de 100.000 especies de organismos patógenos. Pero tales datos solo aportan pruebas indirectas sobre la acción perniciosa de estos insectos. La reputación de las moscas domésticas es como la del hombre acusado de homicidio porque fue hallado de pie junto a la víctima con una pistola cargada en la mano. En la mayoría de los casos, no puede demostrarse que los insectos en cuestión disparasen la pistola. En realidad, hay cuatro agentes potenciales de la trasmisión de las infecciones de cuya propagación se los acusa: los alimentos, los dedos, las heces y las moscas.»

Enzima en 3D

«Los cristalógrafos de rayos X han conseguido por primera vez determinar la estructura tridimensional de una enzima: la de la proteína lisozima. Originalmente descubierta en las lágrimas, donde actúa como antiséptico suave, la lisozima posee la capacidad de disolver los mucopolisacáridos presentes en ciertas paredes bacterianas. La determinación de su estructura ya ha propiciado experimentos para identificar qué zonas de la molécula parecen intervenir cuando destruyen las envolturas bacterianas. El trabajo fue realizado en la Real Institución de Londres. El estudio radiográfico proporciona una imagen de la lisozima con una resolución de dos unidades angstrom.»



TRANSPORTES COLECTIVOS EN CONSTRUCCIÓN: Trabajadores de la ciudad de Nueva York en las penumbras del subsuelo, 1915.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIII, N.º 2, 10 DE JULIO DE 1915



Julio 1915

Trabajo y tiempos de guerra

«Con su extraño atavío de falda, gorra y chaquetón, las mujeres cobradoras en los tranvías ya son una presencia habitual en Berlín y en otras ciudades alemanas. Apocadas al principio, no tardaron en acostumbrarse a la función que se les ha asignado en tiempos de guerra. De hecho, ya muestran la misma desenvoltura que sus compañeros masculinos vendiendo billetes, voceando las paradas y respondiendo a las preguntas de los pasajeros. Pero, como en Alemania nada se deja a la improvisación, esas damas tuvieron que pasar primero por el mismo adiestramiento teórico y práctico que los guardias de tranvía.»

Algodón y cañones

«Para un país en guerra, el algodón resulta vital. En las contiendas pasadas, se utilizaba sobre todo como materia prima de la industria textil, y apenas se empleaba para fabricar pólvora sin humo. El algodón es el principal ingrediente en peso de las pólvoras sin humo, que se componen de nitrocelulosa. Por raro que parezca, hoy en Alemania se consume más algodón en la manufactura de pólvora que en otros usos industriales. La mayor sorpresa de esta guerra es el enorme gasto de munición de artillería. La cantidad media de algodón que entra en cada disparo se aproxima a los dos kilogramos. Su consumo diario en el país ronda las 500.000 toneladas.»

Ferrocarriles metropolitanos

«Cincuenta años atrás, cuando tuvo lugar la primera campaña en pro de un ferrocarril subterráneo para Nueva York, Alfred Craven, ingeniero jefe del Acueducto de Croton, se declaró rotundamente en contra de la propuesta. Puede verse una ironía del destino en la designación del sobrino y tocayo de aquel opositor para el cargo de ingeniero jefe de la Comisión de Servicios Públicos, que ahora está añadiendo más de ochenta kilómetros de nuevas vías (*véase la ilustración*), subterráneas y de superficie, a un sistema de éxito ya demostrado.»



Julio 1865

Helicóptero de vapor

«Una novedosa máquina voladora se halla ahora en proceso de construcción en Hoboken (Nueva Jersey) para el Gobierno de EE.UU. Una hélice de aspas de unos seis metros de diámetro, que gira a cierta velocidad, podría elevar seis toneladas y conservar todavía una notable reserva de potencia. Recuerda a un juguete de niños a gran escala. Vemos a diario a vendedores callejeros que usan una cuerda para imprimir un giro rápido a una pequeña hélice colocada en una varita que, de pronto, alza el vuelo hasta ocho o diez metros para descender lentamente, aún girando mientras baja. Este juguete del Gobierno, como muchos probablemente lo llamarán, es como una canoa en forma de cigarro, hecha de cobre y con cuadernas de hierro. El peso del conjunto, con todo el equipo y la tripulación, alcanza unas seis toneladas.»

NEUROCIENCIA

La plasticidad del cerebro adolescente

Jay N. Giedd

¿Por qué a los adolescentes les atrae el riesgo? ¿Por qué aprenden con tanta agilidad? La clave reside en la versatilidad de sus redes cerebrales.



SALUD PÚBLICA

Freno al dengue

Scott O'Neill

La vacunación del mosquito transmisor con un microbio se convierte en una nueva táctica contra la enfermedad.

MATERIALES

Aislantes topológicos, un nuevo estado de la materia

David Carpentier y Laurent Lévy

Aislantes en el interior y conductores en la superficie, estos nuevos materiales resultan ideales para la magnetoelectrónica y la informática cuántica.



ARQUEOLOGÍA SUBMARINA

En busca de tesoros sumergidos

Philip J. Hilts

Técnicas innovadoras permiten explorar naufragios con la misma precisión que en una excavación arqueológica.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL
Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT
Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Pedro Campos: *Apuntes* y *Un sufrimiento innecesario*; Andrés Martínez: *Apuntes* y *Conjurar la maldición del alzhéimer*; Pablo Loza: *Microscopía de fluorescencia mediante hojas de luz*; Carlos Lorenzo: *Orígenes de los tiranosaurios*; Ana Fernández del Río: *Las enigmáticas propiedades de los gluones*; Claudi Mans: *¿Cómo afecta el cambio climático a los vinos?*; Alfredo Marcos: *En busca de la objetividad*; Juan Manuel González Mañas: *Conversaciones celulares*; José Óscar Hernández Sendín: *Más allá de la ley de Moore* y *El alba de la memcomputación*; Raquel Santamarta: *El secreto de los castillos de arena*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España